

**Polarisation und Dispersion von Oberflächenwellen
am Gräfenberg - Array**

Wolfram Lüders

München 1984

Polarisation und Dispersion
von Oberflächenwellen
am Gräfenberg-Array

Inaugural-Dissertation
zur
Erlangung des Doktorgrades
des
Fachbereichs Geowissenschaften
der
Ludwig-Maximilians-Universität
in München

vorgelegt von
Wolfram Lüders

im März 1984

1. Berichterstatter : Prof. Dr. Gustav Angenheister

2. Berichterstatter : Prof. Dr. Heinrich Soffel

Tag der mündlichen Prüfung 8. Juni 1984

The seismogram is a doorway.
 At my desk with a seismogram spread out,
 I turn into an excited tourist,
 seeking a world as perplexing and foreign
 as the lunar landscape.

B.A. Bolt



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41554009_0016

Inhalt

0.	Einleitung	1
1.	Eigenschaften von Oberflächenwellen	
1.1	homogener elastischer Halbraum	3
1.2	geschichteter elastischer Halbraum	4
1.3	geschichtete elastische Kugel	14
1.4	anelastische Medien	14
1.5	lateral heterogene Strukturen	16
1.6	anisotrope Medien	17
2.	Analysemethoden für Oberflächenwellen	
2.1	Gruppengeschwindigkeits- Dispersionsanalyse	20
2.2	Polarisationsanalyse	21
2.3	Frequenz-Wellenzahl-Analyse	26
3.	Software zur digitalen Signalanalyse (SIG-Programmpaket)	
3.0	Allgemeines	33
3.1	Kommando- und Kontrollsprache	33
3.2	technische Randbedingungen	35
3.3	Syntax, Semantik und Implementierung der SIG-Kommandosprache	35
3.4	Datenstrukturen	40
3.5	Implementierungs-Umfang	42
4.	Beobachtung	
4.1	Quellen der analysierten Ereignisse und Registrierung	44
4.2	Verarbeitung und Simulations-Studien	47
4.3	Diskussion der einzelnen Ereignisse	55
5.	Zusammenfassung	240
	Literaturverzeichnis	243
	Danksagung	245
	Lebenslauf	246

KAPITEL 0

Einleitung

Schon früh in der Geschichte der Seismologie lernte man in Registrierungen entfernter Beben verschiedene Wellengruppen zu unterscheiden. Neben dem Ersteinsatz ("P", Primär-Welle) ist neben einer Vielzahl oft undeutlicher Einsätze im weiteren Verlauf der Registrierungen ein starker zweiter Einsatz ("S", Sekundär-Welle) zu erkennen, dem langgezogene, niederfrequente Wellen mit großen Amplituden ("L" Longae) nachfolgen. Diesen Wellentypen liegen unterschiedliche Ausbreitungsmechanismen zugrunde : Die P-Wellen können als Kompressions-Wellen im Gestein gedeutet werden, bei denen die (Erschütterungs-) Bewegung in der Richtung der Wellenausbreitung liegt; die S-Wellen sind Scher-Wellen, bei denen die Bewegung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung erfolgt. Die Natur der L-Wellen wurde durch die Theorien von Lord Rayleigh 1885 und A.E.H. Love 1911 erhellt. So sind bei dieser Art Wellen zwei Typen zu unterscheiden, die die Namen der oben genannten Wissenschaftler tragen. Hauptsächliches Unterscheidungsmerkmal zwischen den beiden Wellentypen ist ihre Bewegungsrichtung (Polarisation). In isotropen Medien erfolgt die Teilchenbewegung der Love-Wellen in der Horizontalebene senkrecht zur Energieausbreitung, die der Rayleigh-Wellen beschreibt eine elliptische Bahn in der Saggitalebene. Sowohl Rayleigh- als auch Love-Wellen sind, ähnlich Wasserwellen, an die Existenz einer freien Oberfläche gebunden (Oberflächenwellen), sodaß sie sich nicht wie Raumwellen durch die Erde fortpflanzen können, sondern sich entlang der oberen Stockwerke der Erde ausbreiten müssen. Deshalb kann die Interpretation teleseismischer Oberflächenwellen seit der Verfügbarkeit entsprechender Analysealgorithmen wichtige Aussagen über den Aufbau der Lithosphäre und der oberen Astenosphäre liefern. Den Schlüssel zum Aufbau des Untergrunds stellt dabei bisher die Dispersion der Oberflächenwellen dar, d.h. das für Oberflächenwellen typische Phänomen, daß Wellenteile verschiedener Periode sich mit verschiedener, vom Untergrund abhängigen Geschwindigkeit bewegen. Obgleich seit langem bekannt ist, daß auch das Halbachsen-Verhältnis der Rayleigh-Schwingungsellipsen sich periodenabhängig verändert und die Struktur des Untergrunds abbildet, wurden nur sehr wenige Versuche unterschiedlichen Erfolgs unternommen, aufgrund der Elliptizität Modelle zu berechnen (Boore und

Toksoez '69, Sexton et.al. '77)). Wenn es gelänge, die Elliptizität auf wenige Prozent genau zu bestimmen, ergäben sich, wegen der Abhängigkeit der Elliptizität vom v_p/v_s - Verhältnis, auch interessante Anwendungen in der Flachseismik und der Erdbeben-Vorhersage. In erweitertem Sinn kann man unter Polarisierung nicht nur eine feste Schwingungsfigur im drei-dimensionalen Raum verstehen, sondern allgemein eine konstante Amplituden-Phasen-Beziehung zwischen einer beliebigen Anzahl von Zeitreihen. Beim Voranschreiten ebener Wellen über ein Array von Geophonen liefert eine solche verallgemeinerte Polarisationsanalyse Aussagen über die Wellenlänge und die -Ausbreitungsrichtung. Die "high-fidelity" - Registrierungen des Seismologischen Zentralobservatoriums Gräfenberg ermöglichen die Analyse sowohl von drei-Komponenten- als auch von Array-Beobachtungen. In diesem Zusammenhang ist interessant, in wie weit die Analyseergebnisse konsistent sind, ob es systematische Unterschiede zwischen den 3-K-Stationen gibt und ob es systematische Unterschiede abhängig vom Azimut des Bebenherdes gibt. Nach einer Diskussion der theoretisch zu erwartenden Eigenschaften von Oberflächenwellen werden in der vorliegenden Arbeit die Methoden vorgestellt, mit denen die Eigenschaften untersucht werden, um diese Methoden dann an synthetischen und realen Daten anzuwenden. Im ersten Kapitel werden somit die Einflüsse zunehmend kompliziert strukturierter Medien auf die Polarisierung und Dispersion von Oberflächenwellen besprochen. Die im zweiten Kapitel vorgestellten Analysemethoden sind die Frequenz-Wellenzahl-Analyse und eine Kombination von Dispersions- und 2-K-Polarisations-Analyse. Im dritten Kapitel wird das im Umfeld der oben genannten Analysemethoden benötigte "Werkzeug" zur digitalen Signalanalyse beschrieben und etwas allgemeiner auf interaktive Software eingegangen. Der tatsächliche Ablauf der Analysen wird im vierten Kapitel geschildert, ebenso werden die untersuchten Ereignisse im Detail diskutiert. Im letzten Kapitel werden die wichtigsten Ergebnisse zusammengefaßt, und es wird versucht, die Analyseergebnisse zu interpretieren.

KAPITEL 1

Eigenschaften

von Oberflächenwellen

1.1 Das Fernfeld von Oberflächenwellen eines elastischen Halbraums

Oberflächenwellen im elastischen Halbraum lassen sich im Fernfeld als inhomogene ebene Wellen beschreiben, d.h. der Wellenvektor $\vec{k}$ im Term $\exp(i(\vec{k}\vec{x}-\omega t))$ hat eine negative imaginäre Vertikalkomponente, so daß die Welle in die z-Richtung exponentiell gedämpft ist. Im homogenen Halbraum ergibt sich als einzige inhomogene Welle die Rayleigh-Welle aus dem Ansatz für das Verschiebungsfeld $\vec{u}_R = \vec{u}_P + \vec{u}_{SV}$ mit

$$\vec{u}_P = A \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -i\gamma_P \end{pmatrix} \exp(i(\omega t - k \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -i\gamma_P \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}))$$

$$\vec{u}_{SV} = B \begin{pmatrix} i\gamma_S \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \exp(i(\omega t - k \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -i\gamma_S \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}))$$

$$\gamma_{P,S} = (1 - c^2 / v_{P,S}^2)^{1/2}$$

wobei $\vec{u}_{P,SV}$ die Ansätze für inhomogene Wellen vom P- bzw. SV-Typ sind, die sich in x-Richtung ausbreiten. Aus der Bedingung, daß die Spannungen $\tau_{zz} = \tau_{xz} = 0$ an der freien Oberfläche verschwinden müssen, ergibt sich ein homogenes Gleichungssystem für A und B, dessen Lösbarkeit auf die Dispersions-Relation $F(\omega, \vec{k}) = 0$ führt. Im Fall der Rayleigh-Welle ist $F(\omega, \vec{k})$ von ω unabhängig, d.h. die Welle ist nicht dispersiv. Einsetzen des Ansatzes in die Wellengleichung liefert die Lösung

$$\vec{u}_R = A \begin{pmatrix} \exp(-\gamma_P k z) - \delta^* \exp(-\gamma_S k z) / 2 \\ 0 \\ -i\gamma_P (-\exp(-\gamma_P k z) + 2^* \exp(-\gamma_S k z) / \delta) \end{pmatrix} \exp(i(\omega t - \vec{k}\vec{x}))$$

$$\delta = 2 - c^2 / v_S^2$$

die Teilchenbewegung ist demnach elliptisch mit der Elliptizität an der Oberfläche

$$\mathcal{E}_o = \frac{u_{Rx}}{u_{Rz}} \bigg|_{z=0} = \frac{1 - c^2 / (2v_S^2)}{(1 - c^2 / v_P^2)^{1/2}}$$

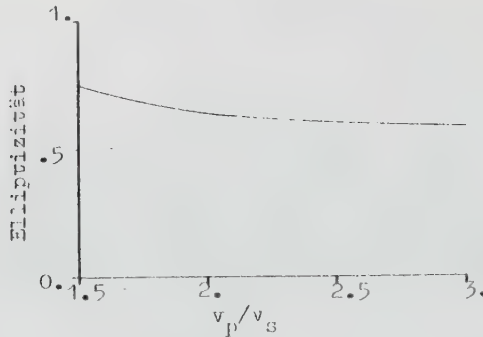


Abb. 1

Abb. 1 zeigt die Elliptizität in Abhängigkeit vom Geschwindigkeitsverhältnis v_P/v_S . Die Achsen der Ellipse stimmen mit der Horizontal- und Vertikalachse überein. Der Ansatz für inhomogene SH-Wellen

$$u_{SH} = \begin{pmatrix} 0 \\ C \\ 0 \end{pmatrix} \exp\left(i(\omega t - k \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -i\sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix})\right)$$

ergibt für den homogenen Halbraum $C=0$; demnach ist für die Existenz von Wellen dieses Typs mindestens eine (homogene) Deckschicht notwendig.

1.2 Das Fernfeld von Oberflächenwellen eines geschichteten, elastischen Halbraums

Im geschichteten elastischen Halbraum mit den Schichtparametern Mächtigkeit, v_P , v_S , und Dichte läßt sich das Verschiebungs-Spannungsfeld in der n -ten Schicht ($z_{n-1} \leq z \leq z_n$) durch Überlagerung von nach oben ($\nearrow$) und nach unten ($\searrow$) sich fortpflanzenden Wellen berechnen. Für SH-Wellen lautet der Ansatz

$$\vec{u}_n = \begin{pmatrix} 0 \\ C \\ 0 \end{pmatrix} (\vec{u}_L + \vec{u}_R)$$

$$\text{mit } \vec{u}_L = C_n'' \exp(i(\omega t - k_n x \sin(f_n) + k_n z \cos(f_n)))$$

$$\vec{u}_L = C_n' \exp(i(\omega t - k_n x \sin(f_n) - k_n z \cos(f_n)))$$

wobei f_n der Inzidenzwinkel der Welle ist.

Für P-SV-Wellen setzt man für das Verschiebungsfeld an

$$\vec{u}_n = \vec{P} + \vec{P} + \vec{SV} + \vec{SV}$$

mit

$$\vec{P} = A_n'' \begin{pmatrix} \sin(e_n) \\ 0 \\ -\cos(e_n) \end{pmatrix} \exp(i(\omega t - k_{pn} x \sin(e_n) + k_{pn} z \cos(e_n)))$$

$$\vec{P} = A_n' \begin{pmatrix} \sin(e_n) \\ 0 \\ \cos(e_n) \end{pmatrix} \exp(i(\omega t - k_{pn} x \sin(e_n) - k_{pn} z \cos(e_n)))$$

$$\vec{SV} = B_n'' \begin{pmatrix} \cos(f_n) \\ 0 \\ \sin(f_n) \end{pmatrix} \exp(i(\omega t - k_{sn} x \sin(f_n) + k_{sn} z \cos(f_n)))$$

$$\vec{SV} = B_n' \begin{pmatrix} -\cos(f_n) \\ 0 \\ \sin(f_n) \end{pmatrix} \exp(i(\omega t - k_{sn} x \sin(f_n) - k_{sn} z \cos(f_n)))$$

wobei e_n, f_n die Inzidenzwinkel für P- bzw. SV-Wellen sind.

Unter Berücksichtigung der Forderung, daß die Tangentialspannungen und Verschiebungen an den Schichtgrenzen stetig sein müssen, lassen sich die Koeffizienten A_n, B_n, C_n einer Schicht durch Multiplikation einer Schichtmatrix, in der die Schichtmächtigkeit und die Elastizitätskonstanten berücksichtigt sind, mit den Koeffizienten $A_{n-1}, B_{n-1}, C_{n-1}$ der darunterliegenden Schicht

berechnen. Sukzessives Anwenden des Verfahrens führt auf eine Verknüpfung der Koeffizienten an der Oberfläche über eine Produktmatrix mit denen des Halbraums unter der letzten Schicht. Mit den Bedingungen, daß die Spannungen τ_{zz}, τ_{xz} an der Oberfläche verschwinden müssen und daß Spannungen und Verschiebungen im Halbraum mit zunehmender Tiefe gegen Null gehen, erhält man ein Gleichungssystem, das nur dann nichttriviale Lösungen hat, wenn die Dispersionsrelation $F(\omega, k) = 0$ erfüllt ist. Diese kann für einen Wert von ω von verschiedenen $k_n(\omega)$ erfüllt werden. Damit sind die Phasengeschwindigkeiten $c_n = \omega/k_n(\omega)$ eine Funktion der Frequenz. Wellen, die zu reellen Lösungen $k_n(\omega)$ gehören, werden als n-te Normalmode bezeichnet, Wellen, die zu komplexen Lösungen gehören als verlustbehaftete Moden, da

sie in Ausbreitungsrichtung exponentiell gedämpft sind. Die Phasendifferenz zwischen Radial- und Vertikalbewegung jeder Mode beträgt $\pi/2$; ein Teilchen an der Oberfläche beschreibt auch im geschichteten Halbraum eine elliptische Bahn, deren Achsen mit der vertikalen und horizontalen Achse übereinstimmen.

Zur Verdeutlichung der Theorie werden im Folgenden die Eigenschaften der Oberflächenwellen an Hand zweier Beispiele erläutert. Zunächst soll der Einfluß der Schichtparameter auf die Elliptizität und die Gruppengeschwindigkeit bei einem Modell mit einer 40 km dicken Schicht ($v_p = 6.5$ km/sec, $v_s = 3.76$ km/sec, $\rho = 2.7$ g/cm³) über dem Halbraum ($v_p = 8.$, $v_s = 4.65$ km/sec, $\rho = 3.3$ g/cm³) untersucht werden. Abb 2a zeigt die Elliptizität und Abb. 2b die Gruppengeschwindigkeits-Dispersion der Rayleigh-Grundmode für das Modell.

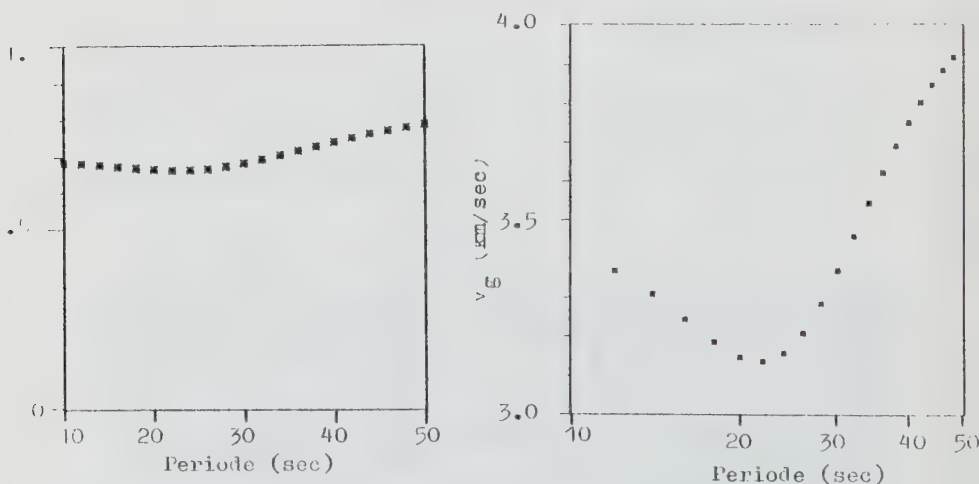
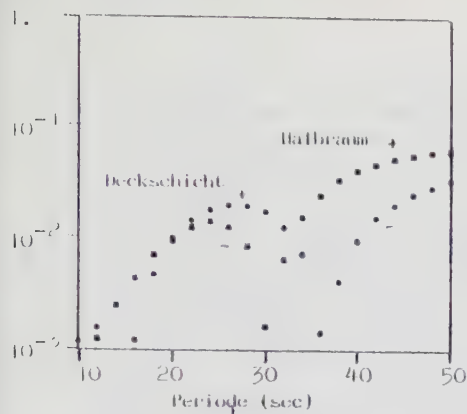
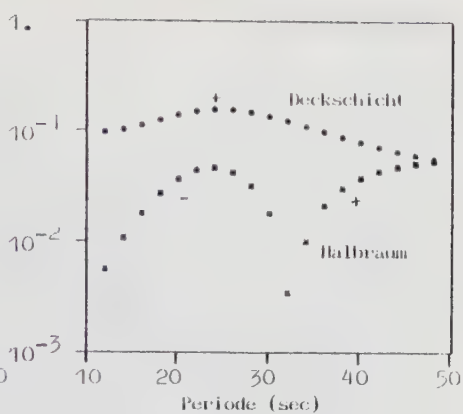


Abb. 2a,b Elliptizität und Gruppengeschwindigkeit für Modell "ES"

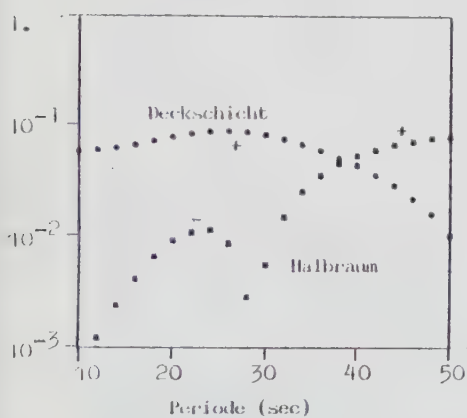
Sowohl die Elliptizität ϵ_e als auch die Gruppengeschwindigkeit v_g sind bei ca. 23 sec Periode minimal. Die Abb. 3 e, f zeigen den periodenabhängigen relativen Einfluß auf ϵ_e und v_g einer Änderung der Schichtmächtigkeit um 10 % zu höheren Werten, $(v_g(h) - v_g(1.1h)) / v_g$. Bei Perioden < 23 sec



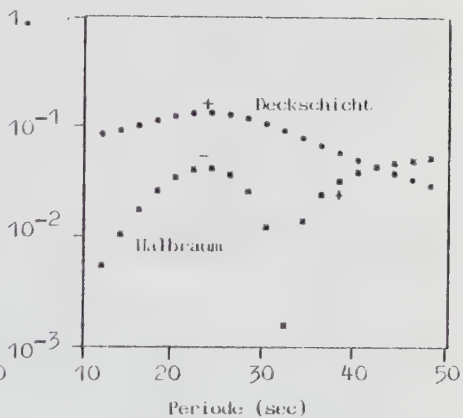
e)



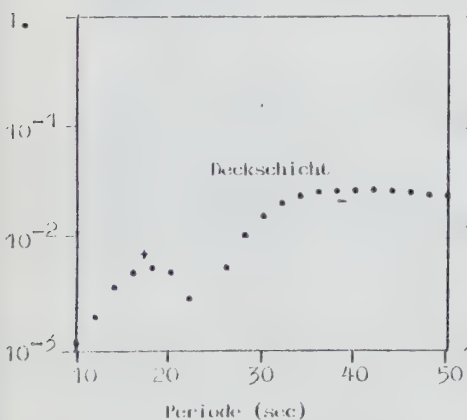
f)



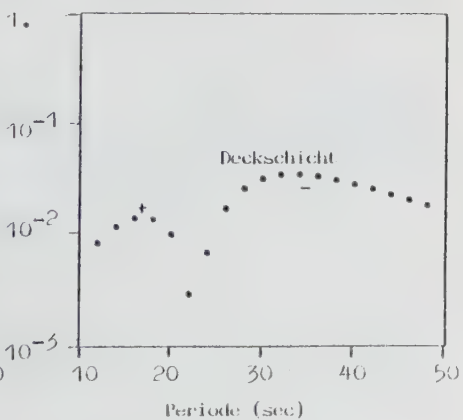
c)



d)



a)



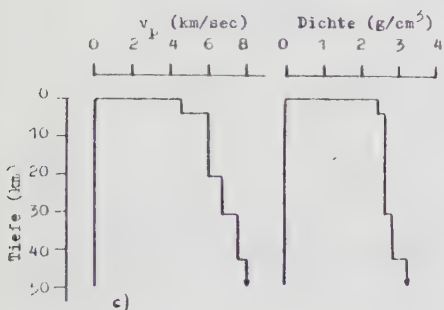
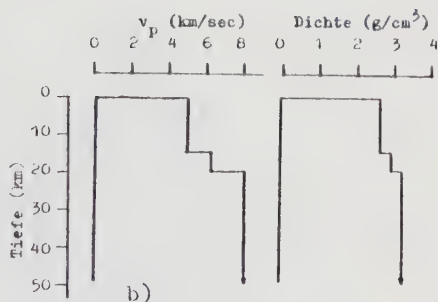
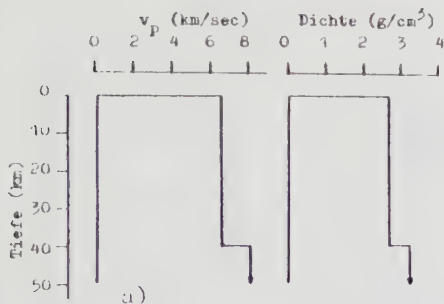
b)

Abb. 3 Partielle Ableitungen von ϵ und v_g des Modells "ES"

Erläuterungen s. Text.

vergrößern sich ξ und v_g mit wachsender Schichtmächtigkeit, bei Perioden > 23 sec sind sie kleiner als im Ausgangsmodell; die Veränderung von v_g ist etwas größer als die von ξ . Der relative Einfluß des v_p/v_s -Verhältnisses durch Veränderung der S-Wellengeschwindigkeit um 10 % nach oben ist in Abb. 3c,d wiedergegeben. Sowohl ξ als auch v_g werden im gesamten dargestellten Periodenbereich durch Vergrößerung der S-Wellengeschwindigkeit der Deckschicht vergrößert, die Erhöhung der S-Wellengeschwindigkeit des Halbraums wirkt sich bei kürzeren Perioden durch Abnahme, bei längeren Perioden durch Zunahme von ξ und v_g aus. Schließlich sind in Abb. 3a,b noch die Änderungen von ξ und v_g bei gleichzeitiger Änderung von v_p und v_s ($v_p/v_s = \sqrt{3}$) um 10 % nach oben dargestellt. Während sich die Geschwindigkeitsänderung der Deckschicht in einer allgemeinen Gruppengeschwindigkeits-Zunahme bemerkbar macht, wird dabei die Elliptizität bei Perioden < 14 sec und > 36 sec vermindert. Abgesehen vom letzten Beispiel verändern sich ξ und v_g bei diesem Modell etwa gleich, wobei der Einfluß auf v_g i.A. größer ist als auf ξ .

Die gleichen Untersuchungen für ein 2-Schichten-Modell "JM" (Abb. 4b) zeigen die Abb. 5a-5f. In Abb. 6a sind die Gruppengeschwindigkeits-Dispersions-Kurven für die Grund- und die 1. höhere Mode der Love- und Rayleigh-Welle dargestellt; Abb. 6b zeigt die zur R0- (Rayleigh-Grundmode) und R1-Mode (1. höhere Rayleigh-Mode) gehörende Elliptizität. Im Vergleich zum vorhergehenden Modell fällt die wesentlich ausgeprägtere Periodenabhängigkeit der Elliptizität und Gruppengeschwindigkeit auf. Der Einfluß der Mächtigkeitsänderung der (geringermächtigen) zweiten Schicht ist fast durchweg eine Größenordnung geringer, als der der oberen Schicht. Deren Erhöhung der Mächtigkeit führt bei Perioden > 14 sec zu einer Abnahme der Gruppengeschwindigkeit und der Elliptizität, jedoch bei Perioden > 36 sec wieder zu einer Zunahme von ξ . Bei der Variation des v_p/v_s -Verhältnisses, fällt auf, daß bereits bei Perioden > 16 sec der Halbraum die Elliptizität am stärksten beeinflusst, der Einfluß der oberen Schicht geringer und entgegengesetzt ist. Die Gruppengeschwindigkeit wird ab Perioden > 16 sec von der S-Wellen-Geschwindigkeitsänderung der Deckschichten zunehmend unabhängig, sodaß in diesem Periodenbereich das v_s des Halbraums praktisch die Gruppengeschwindigkeits-Dispersion bestimmt. Bei gleichzeitiger Veränderung von v_p und v_s ist die Änderung der Elliptizität ähnlich der durch die Variation von v_s bedingten Änderung. Die Gruppengeschwindigkeit wird auch bei längeren Perioden wieder von den Geschwindigkeiten der Deckschichten mitbestimmt. An diesem Modell wird deutlich, daß die Elliptizität unabhängig von der Gruppengeschwindigkeit auf



Modelle, die für theoretische Untersuchungen verwendet wurden :

- a) Einschicht-Modell
- b) Modell "JM"
- c) Modell "OCH"

$$v_p/v_s = \sqrt{3}$$

Abb. 4

Strukturänderungen des Mediums reagiert und der Einfluß der Strukturänderungen auf die Elliptizität von der gleichen Größenordnung ist, wie der Einfluß auf die Gruppengeschwindigkeit.

Wurde bisher der Einfluß des Ausbreitungsmediums auf die Oberflächenwellen diskutiert, so muß zur vollständigen Beschreibung des Wellenfeldes auch der Herdvorgang mitberücksichtigt werden. Nach der Theorie des spektralen Verschiebungsfeldes einer unbewegten Punktquelle (Ben Menahem und Harkrider '64, Seidl und Müller '77) läßt sich der Oberflächenwellen-Anteil jeder Mode im Fernfeld in verschiedene Faktoren separieren:

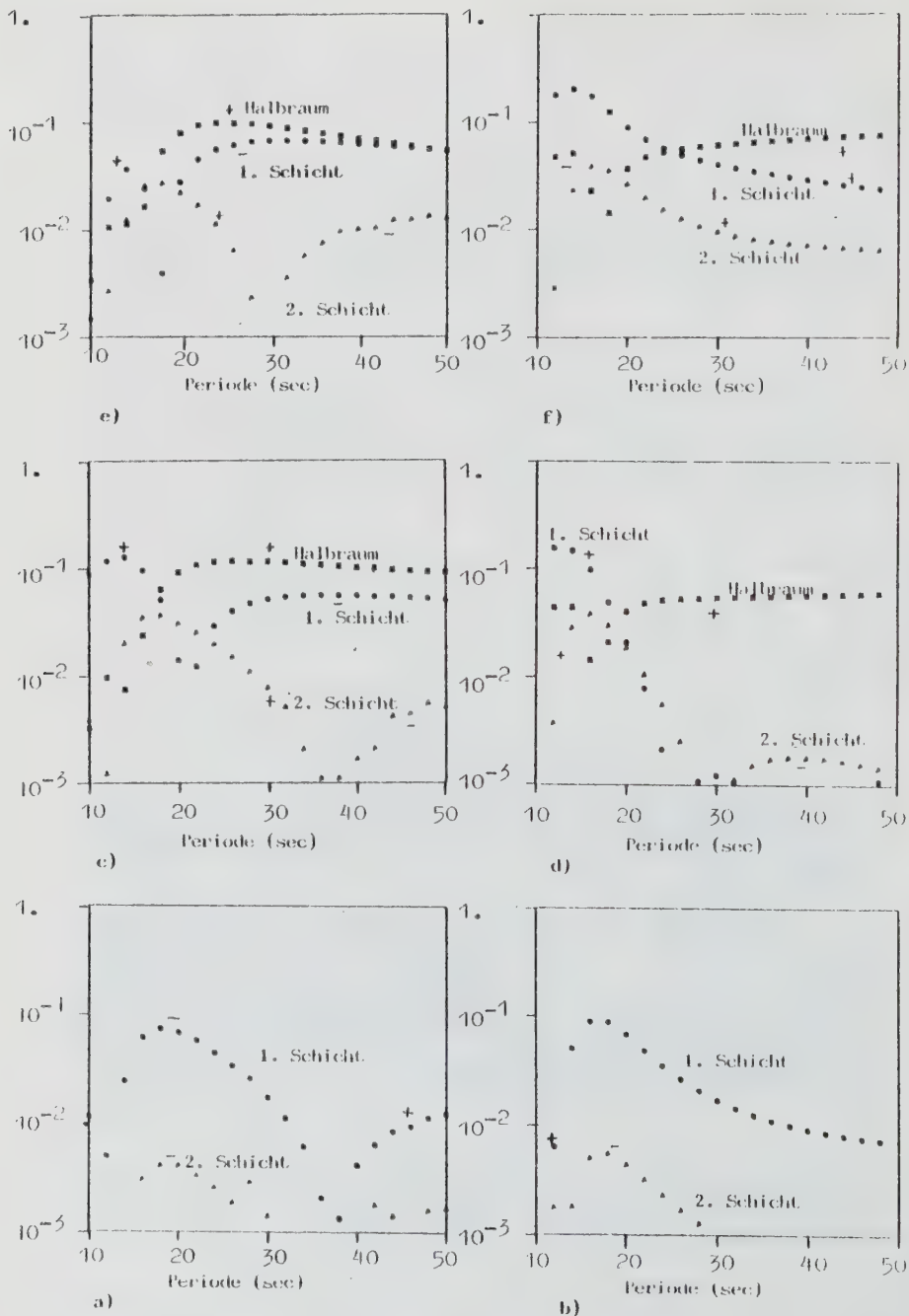


Abb. 5 Partielle Ableitungen von ϵ und ν_j des Modells "JM"
Erläuterungen s. Text.

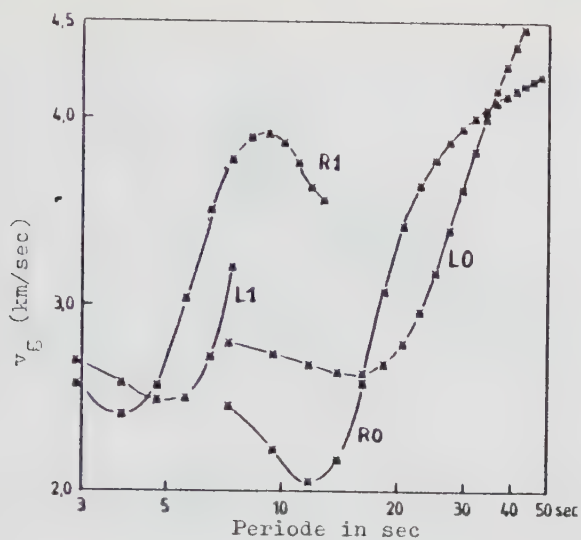


Abb. 6a Gruppengeschwindigkeits-Dispersion für das Modell "JM"

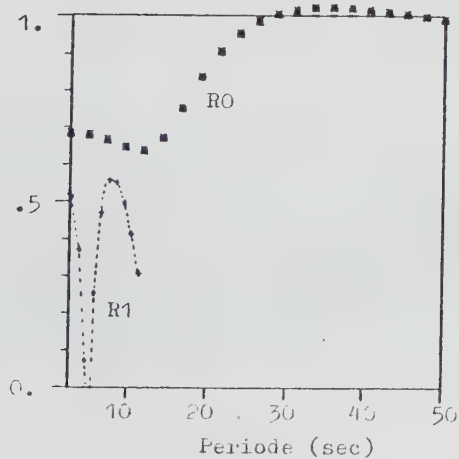


Abb. 6b Elliptizität der R0- und R1-Mode für das Modell "JM"

$$\vec{U}_R = S(w) \Pi_R(w, \theta, h) E_R(w) x^{-1/2} * \exp(i \vec{k}_R(w) \vec{x}) \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ i/\varepsilon(w) \end{pmatrix}$$

$$\vec{U}_L = S(w) \Pi_L(w, \theta, h) E_L(w) x^{-1/2} * \exp(i \vec{k}_L(w) \vec{x}) \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

wobei $S(w)$ das Spektrum des Herdpulses ist; $\Pi_{R,L}(w, \theta, h)$ ist der vom Herdmechanismus abhängige Geometriefaktor, der die Anfangs-Phasenverschiebung und die komplexe Abstrahlcharakteristik berücksichtigt. In diese geht das Azimut θ , die Herdtiefe h und die Dislokations-Richtung ein, so daß verschiedene Perioden bei einem Azimut verschieden stark angeregt und mit unterschiedlicher Phase abgestrahlt werden können. Detaillierte Untersuchungen hierzu stellten Ben-Menahem und Harkrider ('64) an. $E_{R,L}(w)$ ist die vom Herd unabhängige Anregungsfunktion, in der die Schichtparameter verrechnet werden, und die separiert werden kann in die vertikale (horizontale) Antwortfunktion eines δ -Impulses einer vertikalen (horizontalen) Oberflächen-Punktkraft und die Ausbreitungsfunktion, die die Dispersion beschreibt; im Ausdruck $E_R(w)$ steht als zusätzlicher Faktor die Oberflächen-Elliptizität, die unabhängig von der Herdgeometrie und -Tiefe ist. Die Amplituden der stark dispergierten Teile der Welle nehmen proportional zur Wurzel der Entfernung vom Herd ab. Der Aufbau dieser quasiharmonischen Schwingungen wird durch die Gruppengeschwindigkeit $U(w) = -(dF/dk)/(dF/dw)$ bestimmt, die die Geschwindigkeit des Energieflusses darstellt. Die schwach dispergierten Teile der Welle, bei denen die Gruppengeschwindigkeit extremal wird, werden als Airy-Phasen bezeichnet. Deren Amplituden nehmen proportional zur dritten Wurzel der Entfernung ab. Die Amplitudeneinhüllende ist die Airy-Funktion (Pekeris '48), deren Maximum nicht mit dem Extremum der Gruppengeschwindigkeit übereinstimmt, sodaß das Energiemaximum des Verschiebungsfeldes früher als die entsprechende Gruppenlaufzeit zu beobachten ist.

Zu dem Modell "JM" (Abb. 4b) wurden synthetische 3-Komponenten-Seismogramme nach der Reflektivitätsmethode mit einem Programm von G. Müller berechnet. Abb. 7 zeigt die Montage geschwindigkeits-proportionaler Vertikal- und Transversal-Komponenten. Die Raumwellen sind nicht zu erkennen, jedoch sind bei den Oberflächenwellen eine Menge Details zu beobachten. Als Herd wurde eine punktförmige Dislokation in 10 km Tiefe mit einem links-lateralen Strike-Slip-Mechanismus angenommen, wobei die Bruchfläche einen Winkel von 150° zum Beobachter bildet. Das geschwindigkeits-proportionale Herdspektrum hat sein Maximum bei 10 sec. Die größten

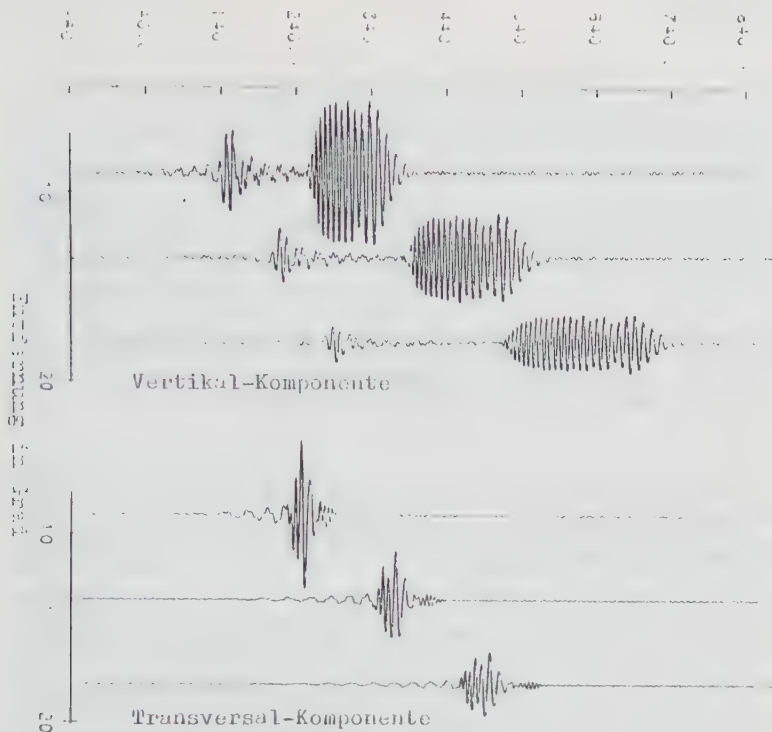


Abb. 7 Theoretische Seismogramme für das Modell "JM"

Amplituden in der Montage gehören zu dem invers dispergierten Ast der Gruppengeschwindigkeits-Kurve der Rayleigh-Grundmode; deutlich ist das durch die Dispersion bedingte "Zerfließen" dieses Wellenpakets mit zunehmender Entfernung zu erkennen. Die am Ende des Wellenzugs zu erwartende Airy-Phase ist nur durch eine kleine Amplituden-Modulation angedeutet. Der normal dispergierte Teil der Rayleigh-Grundmode ist im Periodenbereich zwischen 21 und 26 sec am stärksten angeregt und zeigt im Periodenbereich zwischen 14 und 17 sec fast keine Energie, sodaß die Amplituden bereits sehr gering sind, wenn die invers dispergierte Wellengruppe einsetzt.

Dem normal dispergierten Wellenzug der Rayleigh-Grundmode ist ein impulsförmiges Wellenpaket überlagert, das die zum Gruppengeschwindigkeits-Maximum gehörende Airy-Phase der 1. höheren Rayleigh-Mode darstellt. Der normal dispergierte Teil dieser Mode ist relativ schwach angeregt, so daß er im numerisch bedingten 6 sec -Rauschen, das die Seismogramme überlagert, nicht ganz klar als auf der Grundmode "reitender" Wellenzug zu erkennen ist. In der Montage der Transversal-Komponenten ist die Überlagerung des normal- und invers-dispergierten Asts der Gruppengeschwindigkeits-Kurve der Love- Grundmode deutlich zu erkennen. Die Airy-Phase der Grundmode zeigt erwartungsgemäß die größten Amplituden. Ihr schließt unmittelbar ein höherfrequenter (5 sec) Wellenzug mit geringerer Gruppengeschwindigkeit an, der als Airy-Phase der 1. höheren Love-Mode zu identifizieren ist.

1.3 Oberflächenwellen auf einer radial geschichteten Kugel

Die exakte Ableitung der Wellenausbreitung auf einer elastischen Kugel unter Berücksichtigung der Gravitation führt nach Alterman et al. ('61) auf ein Differentialgleichungssystem dessen Lösung nur diskrete Eigenfrequenzen zuläßt. Bei Schwingungsmoden höherer Ordnung läßt sich durch Interpolation zwischen den Eigenfrequenzen ein quasikontinuierliches Spektrum mit den zugehörigen Phasengeschwindigkeiten berechnen. Die Fläche-Erde-Transformation ersetzt unter Vernachlässigung der Gravitation den Einfluß der Sphärizität durch die Wirkung einer mit der Tiefe linear zunehmenden Geschwindigkeitskorrektur im Halbraum. Die so berechneten Geschwindigkeiten stimmen für Perioden < 300 sec innerhalb der 1%-Fehlergrenze mit den exakt berechneten überein. In der vorliegenden Arbeit wird ausschließlich die Fläche-Erde-Transformation angewandt.

1.4 Oberflächenwellen in dissipativen Medien

In den bisherigen Betrachtungen war die Dispersion durch Randbedingungen im Ausbreitungsmedium verursacht (geometrische Dispersion). Energieabsorbierende Medien lassen sich durch spezifische räumliche Gütefaktoren charakterisieren: $Q(\omega) = k(\omega) |E(\omega)| / q(\omega)$, wobei $k(\omega)$ die reelle Wellenzahl, $|E(\omega)|$ der Betrag der Energiestromdichte und $q(\omega)$ die pro Volumen- und Zeiteinheit absorbierte Energie ist (Seidl '71). Zu den bisherigen

Schichtparametern kommen noch die Gütefaktoren Q_p und Q_s der P- und S-Wellen hinzu. Scharfe P- und S-Wellen-Einsätze auch in großen Entfernungen lassen auf hohe Gütefaktoren schließen. Seidl ('71) kam zu dem Ergebnis, daß die materielle Dispersion um etwa 4 bis 5 Größenordnungen kleiner ist als die geometrische Dispersion. In der Wellengleichung kann schwache Anelastizität durch Einführung eines komplexen Wellenvektors oder äquivalent dazu durch Einführung komplexer Geschwindigkeiten $v_p^*, v_s^* = v_p, v_s \cdot (1 + i/(2Q_{p,s}))$ berücksichtigt werden. Macht man den gleichen Ansatz für die Phasengeschwindigkeit von Rayleigh-Wellen im homogenen Halbraum und setzt die Geschwindigkeiten in die Dispersionsrelation ein, so ergibt sich nach Entwicklung nach Potenzen von $1/Q$ eine Beziehung der Art

$$1/Q_R = r/Q_p + (1-r)/Q_s$$

wobei r eine Funktion des v_p/v_s -Verhältnisses ist. Für ein Verhältnis von $\sqrt{3}$ ergibt sich $1/Q_R = .134/Q_p + .866/Q_s$. Zu dem Ausdruck für das Verschiebungsfeld kommt noch der Faktor $\exp(wx/(2Q_R c))$, wobei x die Entfernung zwischen Herd und Beobachtungspunkt ist. Boore und Toksöz ('69) geben einen vereinfachten Ausdruck für die Elliptizität von Rayleigh-Wellen im homogenen anelastischen Halbraum an

$$\epsilon_e = \frac{-i(2-b)}{2\sqrt{1-a}} - \frac{a(2-b) + m(2b-2a-ab)}{4(1-a)\sqrt{1-a}} \quad (1/Q_s - 1/Q_p)$$

mit $a = (c/v_s)^2$

$$b = (c/v_p)^2; \quad m = \frac{a(2-b)(1-b)}{a(2-b)(1-b) - b(1-a)(2-3b)}$$

Der Imaginärteil von ϵ_e ist der Ausdruck für die Elliptizität im elastischen Halbraum, der die Gütefaktoren enthaltende Term bewirkt eine Neigung der Achsen der Schwingungsellipse. Die für einen Extremfall ($v_p/v_s = .55$, $Q_p = 2.5 Q_s$, $Q_s = .1$) berechnete Elliptizität zeigt lediglich 2 grad Neigung der Schwingungsellipse.

Bei der Berechnung synthetischer Seismogramme mit einem Programm von R. Kind für ein Mehrschichten-Modell "OM" (Abb. 4c) wobei $Q_p = 120$, und $Q_s = 60$, für alle Schichten angenommen wurde, konnte kein Einfluß auf die Elliptizität erkannt werden.

1.5 Lateral heterogene Strukturen

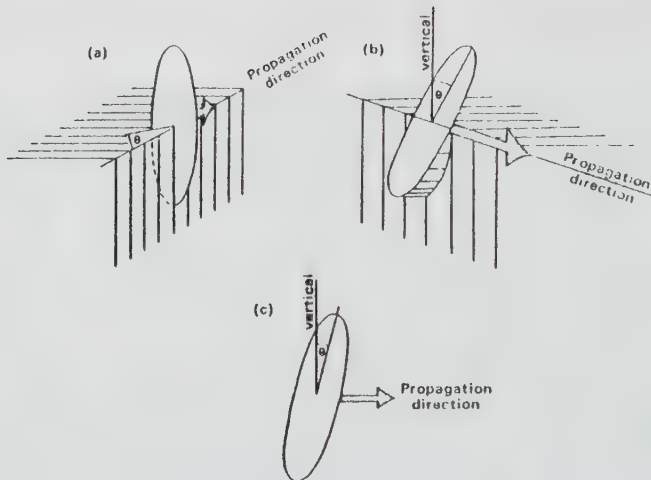
Für die Ausbreitung der Rayleigh-Grundmode über eine vertikale Diskontinuität zeigt Capon ('69, '70) unter Vernachlässigung der Konversion in höhere Moden mit der Methode der stationären Phase, daß das Snellsche Gesetz $\sin(\theta_1)/c_1 = \sin(\theta_2)/c_2$ gilt, wobei $\theta_{1,2}$ der horizontale Inzidenz- (Emergenz-) Winkel und $c_{1,2}$ die Phasengeschwindigkeiten für die aneinander grenzenden Viertelräume sind. Für die Laufzeiten zwischen zwei Punkten über die Diskontinuität gilt $t = r_1/u_1 + r_2/u_2$ wobei $r_{1,2}$ die Längen des Laufwegs zwischen den Punkten und der Diskontinuität und $u_{1,2}$ die Gruppengeschwindigkeiten der Viertelräume sind. Nach dem Fermatschen Prinzip sind die Laufwege Wege stationärer Laufzeit, was für Rayleigh-Wellen bedeutet, daß die ersten "Einsätze" dem Weg minimaler Laufzeit gefolgt sind, es jedoch bei realistischen Erdmodellen mehrere mögliche Wege stationärer Laufzeit gibt (multiple Wege). Beispiele vertikaler Diskontinuitäten sind in Anbetracht der großen Wellenlängen Ozean- Kontinentalränder, wobei die ozeanischen Phasen- und Gruppengeschwindigkeiten bei Perioden > 15 sec größer sind als die kontinentalen. Da sich die Phasengeschwindigkeiten bei längeren Perioden (> 40 sec) angleichen, ist bei diesen Perioden nach dem Snellschen Gesetz geringere Refraktion zu erwarten. Boore und Toksoez ('69) untersuchten die Auswirkungen von zwei sich über multiple Wege ausbreitenden Rayleigh-Wellen auf die Elliptizität E_* . Die als Quotient der Spektren von Horizontal- und Vertikal-Komponente berechnete (komplexe) Elliptizität $E_*(w)$ eines Wellenzugs wird durch die Überlagerung des zweiten Wellenzugs sowohl im Betrag als auch in der Phase moduliert. Die Modulation der Phase, d.h. die Drehung der Ellipsenachsen ist Null, wenn der Winkel zwischen den Ausbreitungsrichtungen der Wellen Null ist. Bei einem Winkel von 20 grd zwischen den Ausbreitungsrichtungen wird der Betrag der komplexen Elliptizität nur dann nennenswert verändert, wenn die Phasenverschiebung zwischen den Wellen etwa 180 grd beträgt. Elliptizitätswerte, die den durch multiple Wege entstandenen Schwebungsminima der Oberflächenwellen entsprechen, weichen demnach am stärksten von den Werten für eine einzelne Welle ab. Ähnliches gilt für die Achsenrichtung der Schwingungsellipse. Die Ausbreitung von Oberflächenwellen über komplizierte Modelle wurde mit der Finite-Element-Methode von Drake ('72) untersucht. Drake berechnete das Verschiebungsfeld von Rayleigh-Wellen an einer Ozean- Kontinental- Grenze zwischen dem Pazifik und Berkeley bei senkrechtem Einfall einer monochromen Welle. Bei einer Periode von ca. 21 sec wird praktisch keine Energie reflektiert, gleich ob die Ausbreitung zur ozeanischen oder kontinentalen Seite hin erfolgt. Etwa 4% der transmittierten Energie wird in höhere Moden konvertiert. Die Elliptizität der Rayleigh-Grundmode

am Ozeanboden (.855) stimmt nahezu mit der auf dem Kontinent berechneten (.84) überein. Im Gegensatz zur Rayleigh-Grundmode wird von der Love-Grundmode beim Übergang Ozean-Kontinent ein erheblicher Energieanteil in höhere Moden konvertiert.

Bei der Berechnung von senkrecht von der Ozeanseite her einfallenden Love-Wellen stellten Drake und Bolt ('80) fest, daß bei Perioden zwischen 11 und 20 sec 90 % der Energie der Grundmode als erste höhere Mode transmittiert werden. Im Periodenbereich zwischen 8 und 15 sec werden unabhängig von der Einfallrichtung nur 2 % der Energie der Grundmode wieder als Grundmode transmittiert. Gregersen und Alsop ('76) kommen zu qualitativ gleichen Ergebnissen und stellen fest, daß die Transmissions- Koeffizienten nahezu unabhängig vom Einfallswinkel (0-60 grd) sind. In wie weit die höhere Mode die Grundmode kontaminiert, läßt sich nicht allgemein beantworten, da beide Moden unterschiedliche Gruppengeschwindigkeiten aufweisen und der maximale Energietransport der höheren Mode i.A. in größerer Tiefe erfolgt, als bei der Grundmode, sodaß deren Oberflächen-Amplituden vergleichsweise klein sein können. Im Gegensatz zu Love-Wellen ist der transmittierte Energieanteil der Rayleigh-Welle nach Untersuchungen von Chen und Alsop ('79) an einem Modell aus zwei Viertelräumen stark abhängig vom Einfallswinkel: Bei einem Einfallswinkel von 40 grd werden nur noch 50 % der Energie transmittiert.

1.6 Anisotropie

In einer Reihe von Veröffentlichungen untersuchte Crampin(75), Crampin et al. ('77,'81) die Ausbreitung von Oberflächenwellen in anisotropen Medien. Einige Ergebnisse sollen in diesem Kapitel kurz zusammengefaßt werden. Die Teilchenbewegung an der Oberfläche eines Halbraums bei beliebiger Orientierung der Symmetrieebenen, ist eine Ellipse deren Achsen nur bei bestimmten Richtungen der Symmetrieebenen mit der Ausbreitungsrichtung der Welle übereinstimmen. Die Bewegungsgleichung führt durch die Kopplung zwischen P,SV und SH-Anteilen auf verallgemeinerte Oberflächenwellen (symbol. "G" für "Generalized"), deren Grundmode ("FG", Fundamental Generalized) im wesentlichen Rayleigh- ("R0", Rayleigh Grundmode) und deren erste höhere Mode im wesentlichen Love-("L0", Love Grundmode) Charakter hat. Bei Wellenausbreitung parallel oder senkrecht zu Symmetrieebenen ist der SH- vom P-SV-Anteil wie im isotropen Medium entkoppelt. Abb. 8 zeigt die Polarisations-Charakteristika für bestimmte Symmetrieverhältnisse. Ist die Oberfläche des Ausbreitungsmediums eine



Three types of particle motion characteristic of particular symmetry orientations: (a) Inclined-Rayleigh motion—horizontal plane of symmetry, (b) Tilted Rayleigh motion—propagation at right angles to vertical plane of symmetry, and (c) Sloping-Rayleigh motion—propagation with the sagittal plane of symmetry

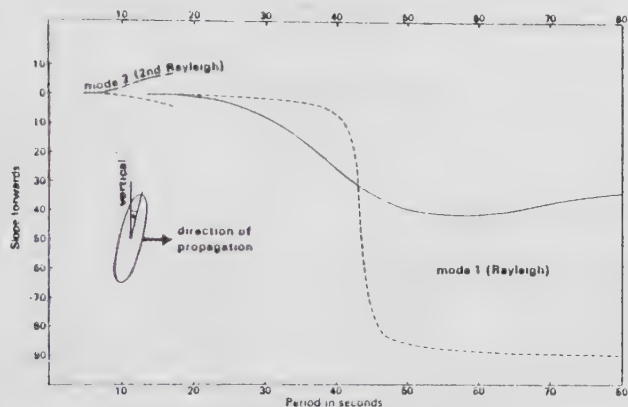
entnommen aus S. Crampin ('75)

Abb. 8 Rayleigh-Wellen-Polarisation in anisotropen Medien

Symmetrieebene, so ist die Polarisationsellipse relativ zur Ausbreitungsrichtung inkliniert (8a); bei einer Ausbreitungsrichtung rechtwinklig zu einer vertikalen Symmetrieebene, weist die Ellipse eine Neigung von der Vertikalen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung auf (8b), bei Ausbreitung entlang einer sagittalen Symmetrieebene eine Neigung von der Vertikalen in Ausbreitungsrichtung (8c). Im geschichteten Halbraum ändern isotrope Schichten an den Polarisations-Charakteristika nichts.

Für ein Drei-Schichten-Modell mit einer orthorhombischen Olivinschicht zwischen 30 und 60 km Tiefe berechnete Crampin ('75) die Abweichungen der Polarisation vom isotropen Fall. Bei horizontaler Symmetrieebene des Olivins treten maximale Inklinationswinkel der Grundmode zwischen 25 und 30 sec Periode auf, deren Größe von der Ausbreitungsrichtung abhängt. Bei einer Ausbreitungsrichtung von 30° von der (001)-Kristallachse zur (100)-Achse auf der (010)-Fläche beträgt die maximale Inklination der

1G-Mode ca. 20 grd, die der Quasi-10-Mode ca. 9 grd. Da die Tiefe der maximalen Energieausbreitung bei der 3G-Mode (= erste höhere Rayleigh Mode) im Bereich der anisotropen Schicht liegt, sind die Polarisations- Anomalien dieser Mode entsprechend stark ausgebildet. Die Abhängigkeit des Neigungswinkels von der Periode bei saggitaler Symmetrie ist in Abb. 9 dargestellt. In diesem Fall weist die Quasi-R0- Mode keinen SH-Anteil auf.



The variation with period of the deviations of generalized waves, having sloping-Rayleigh particle-motion, propagating in the layered structure, when the sagittal plane is a plane of symmetry. The olivine layer is x-propagating at cuts of 30° (solid line) and 60° (dashed line) measured from (001) towards (100).

entnommen aus S. Crampin (1975)

Abb. 9 Neigung der Polarisationsellipsen bei saggitaler Symmetrie

KAPITEL 2

Analysemethoden für

Oberflächenwellen

2.1 Dispersionsanalyse

Die Dispersionsanalyse von Oberflächenwellen soll die Abhängigkeit der Gruppen- bzw. Phasengeschwindigkeit von der Periode ermitteln und damit auch verschiedene Moden mit verschiedenem Dispersionsverhalten trennen. Computergerechte Algorithmen zur Analyse der Gruppengeschwindigkeits-Dispersion sind das Moving-Window- und das Multiple-Filter-Verfahren (Dziewonski und Hales ('72)). Beim Moving-Window-Verfahren wird die Amplitude einer Fourier-Komponente bestimmt, wobei sich die Lage des Zeitintervalls aus der Gruppengeschwindigkeit und seine Länge aus der zu der jeweiligen Fourier-Komponente gehörenden Periode ergibt.

Beim Multiple-Filter-Verfahren wird der Seismogrammausschnitt der dem zu analysierenden Geschwindigkeitsbereich entspricht, mit einem Satz von Bandpässen gefiltert und die Momentanamplituden (Enveloppen) an den, den einzelnen Gruppengeschwindigkeiten entsprechenden Zeitpunkten bestimmt. Das Ergebnis ist eine Matrix von Amplitudenwerten, deren Zeilen zu gleichen Geschwindigkeiten und deren Spalten zu gleichen Perioden gehören. Üblicherweise wird in der Seismologie das Geschwindigkeitsintervall linear unterteilt, die Perioden hingegen linear entlang der logarithmischen Skala. Für die Wahl der Form der Bandpaß-Übertragungsfunktion gibt es verschiedene Kriterien (Inston '71, Canitez '77), wobei jedoch i.A. Gauss-Filter $H(\omega) = \exp(-\alpha(\omega - \omega_m)^2 / \omega_m^2)$ (ω_m Mittenfrequenz, α relative Bandbreite) wegen ihrer optimalen Frequenz- Zeit- Auflösung bevorzugt werden. Die Amplituden- Einhüllende $\tilde{x}(t)$ einer Zeitreihe $x(t)$ läßt sich als Betrag des analytischen Signals $x + i\hat{x}$ berechnen, wobei $\hat{x}(t)$ die Hilbert-Transformierte von $x(t)$ ist, d.h. die Zeitreihe, deren Spektralkomponenten um $\pi/2$ gegenüber denen von $x(t)$ verschoben sind. In der vorliegenden Arbeit wurde das Multiple-Filter-Verfahren verwendet.

Der Algorithmus wurde in zwei Programmen implementiert. Im Berechnungsteil des ersten Programms wird der zu untersuchende Seismogrammausschnitt an den Rändern mit einer cos-Fensterfunktion multipliziert und mit einer schnellen Fourier-Transformation analysiert. Das Ergebnis wird wahlweise mit der inversen Geophoncharakteristik multipliziert und wegen des beschränkten Adreßraums des Rechners in eine temporäre Datei abgelegt. Für jede Periode wird das Spektrum mit dem zugehörigen Gauss-Bandpaß multipliziert. Das analytische Signal wird nicht getrennt synthetisiert, indem das Schmalband-Spektrum und das mit i multiplizierte Schmalband-Spektrum rücktransformiert werden, sondern es wird mit einer Rücktransformation erzeugt, indem der negative Teil des Spektrums Null gesetzt wird. Formal muß man dazu zum Signalspektrum $X(f)$ einen Anteil $iY(f) = \text{sgn}(f)X(f)$ addieren, sodaß für das gesamte Spektrum $A(f) = 0$ für $f < 0$ und $A(f) = 2X(f)$ sonst gilt. Dem formal im Frequenzbereich addierten Anteil entspricht nach dem Faltungssatz und der Korrespondenz $i/(\pi \cdot t) \longleftrightarrow \text{sgn}(f)$ im Zeitbereich dem Faltungsprodukt $1/(\pi \cdot t) \otimes x(t)$, was nichts anderes ist, als die Hilbert - Transformierte des Signals $x(t)$. Die schmalband-gefilterten analytischen Signale werden in einer Datei abgespeichert, da diese Zwischenergebnisse zur Polarisationsanalyse verwendet werden können. Das zweite Programm bildet lediglich aus den gespeicherten Schmalband-Signalen zu den, den Gruppengeschwindigkeiten entsprechenden Zeitpunkten die Einfallende und speichert die entstandene Gabor-Matrix ab. Eine übersichtliche Darstellung der Matrix erfolgt durch Zeichnung von Linien gleicher Momentanamplitude, wobei der Abstand zwischen den Isolinienniveaus logarithmisch oder wie in dieser Arbeit linear aufgeteilt werden kann.

2.2 Polarisationsanalyse

Die Polarisation eines Drei-Komponenten- Prozesses wird z.B. durch die Lage des Polarisationsellipsoids, dessen Halbachsenverhältnisse und den Polarisationsgrad beschrieben. Alle Größen lassen sich aus den Eigenvektoren und Eigenwerten der Spektralmatrix berechnen (Samson '77). Im Fall starker Polarisation entartet das Ellipsoid zur Polarisationsellipse. Durch Begrenzung auf eine Bandbreite Δf um die Mittenfrequenz f mit $\Delta f/f \ll 1$ erzwingt man für ein Zeitintervall T , ($1/f < T < 1/\Delta f$) konstante Amplituden und Phasen und somit starke Polarisation. Damit zerfällt die Polarisationsanalyse von Oberflächenwellen unter Vernachlässigung der Einflüsse durch Anisotropie in zweidimensionale Teilanalysen: Bestimmung der Ausbreitungsrichtung der Welle in der Horizontalebene und

für Rayleigh-Wellen Bestimmung der Elliptizität der Polarisationsellipse in der Sagittalebene und Kontrolle der Neigung der großen Halbachse. Ohne Berücksichtigung des Schwingungsbilds der Oberflächenwellen kann in erster Näherung das geographische Azimut Herd-Beobachtungspunkt als Ausbreitungsrichtung angenommen werden. Zur Bestimmung der Ausbreitungsrichtung der Rayleigh-Welle schlug Gebrande ('82) vor, diese aus der Forderung herzuleiten, daß die Vertikal- und Radial-Komponente 90 grd Phasendifferenz aufweisen. Am Beispiel des Baikal-Bebens (s. Tabelle S. 4-2) ergab der Einsatz des Verfahrens zeitlich stark variierende Azimute, die in benachbarten Frequenzbändern relativ geringe Ähnlichkeit aufweisen. Ohne weitere Ausgleichsverfahren kann offenbar die notwendige Bedingung, daß Love- und Rayleigh-Anteile nicht in Phase sind, nicht in allen Fällen vorausgesetzt werden. Eine andere von Gebrande ('82) vorgeschlagene Möglichkeit, die Ausbreitungsrichtung an einem Beobachtungspunkt zu ermitteln, ergibt sich aus der Forderung, daß die Horizontalkomponenten durch Drehung in die Ausbreitungsrichtung bzw. senkrecht dazu maximal entkoppelt sind. Maximale Entkopplung zwischen Zeitreihen ist im Frequenzbereich gleichbedeutend mit minimaler Kohärenz. Die Abhängigkeit der Kohärenz $C = S_{xy} / \sqrt{(S_{xx} S_{yy})}$ vom Drehwinkel ist gegeben durch

$$C(\varphi) = (\cos(2\varphi) \cdot \text{Re}(S_{xy}) + 0.5 \cdot \sin(2\varphi) \cdot (\text{Re}(S_{yy}) - \text{Re}(S_{xx})) + \text{Im}(S_{xy})) / \text{Nenner}$$

$$\text{Nenner} = (\cos^2 \varphi \cdot S_{xx} + \sin^2 \varphi \cdot S_{yy} + \sin(2\varphi) \cdot \text{Re}(S_{xy})) + (\sin^2 \varphi \cdot S_{xx} + \cos^2 \varphi \cdot S_{yy} - \sin(2\varphi) \cdot \text{Re}(S_{xy}))^{1/2}$$

wobei S_{xy} das Kreuzspektrum und S_{xx} und S_{yy} die Power-Spektren der Zeitreihen sind. Da der Imaginärteil $\text{Im}(S_{xy})$, der angibt, wie stark die Spektralkomponenten der Zeitreihen außer Phase sind, winkelunabhängig einen Beitrag zur Kohärenz liefert, ist die Differenz zwischen maximaler und minimaler Kohärenz ein Maß für die lineare Polarisation zwischen den Komponenten. Abb. 10 zeigt die Kohärenzrosetten für das Baikal-Beben (s. Tabelle S. 4-2), bei denen radial der Betrag der Kohärenz in Abhängigkeit vom Drehwinkel gezeichnet ist. Die Azimute sind kleiner als das geographisch berechnete (48 grd E), decken sich jedoch mit den aus den Hodographen ablesbaren. Die Kohärenz macht Aussagen über im Analyseintervall stationäre Zeitreihen, zeitliche Veränderungen im Analyseintervall werden gemittelt. Zugunsten hoher Frequenzauflösung muß auf die Auflösung sich im Analysezeitintervall verändernder

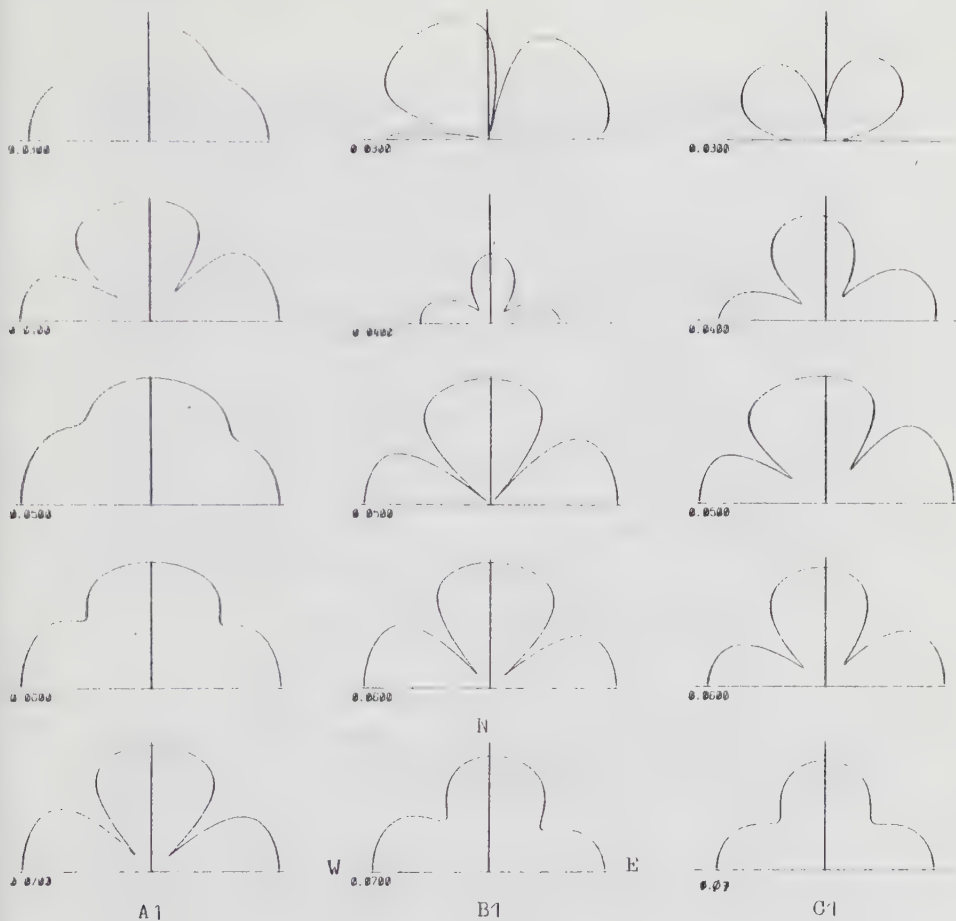


Abb. 10 Kohärenz-Rosetten der Horizontal-Komponenten der Stationen A1, B1, C1 während des Baikal-Bebens. Die Zahlen unter den Rosetten bezeichnen die Frequenz.

Polarisationsparameter verzichtet werden. Dies ist bei der Analyse komplizierter Ereignisse schwerlich hinnehmbar, da sich dabei i.A. verschieden dispergierte Wellenzüge überlagern. Es bieten sich zwei Möglichkeiten an, die Polarisation frequenz- und zeitabhängig zu berechnen:

- im Frequenzbereich durch Kurzzeit-Spektralanalyse und Analyse der Spektralmatrix bzw. der Kohärenzen,
- im Zeitbereich durch Schmalband-Filterung und Analyse der Kovarianzmatrix.

Da bei der Dispersionsanalyse die Multiple-Filter-Methode gebräuchlicher ist, bereits Erfahrungen in der Auswertung der Kovarianzmatrix vorlagen (Lüders '78) und die Darstellung zeitlich konsekutiver Hodographen relativ anschaulich ist, wurde in dieser Untersuchung letzteres Analyseverfahren verwendet. Unter Vernachlässigung der schwachen Zeitabhängigkeit von Amplituden und Phasen der schmalband-gefilterten Zeitreihen ergibt sich mit

$$x(t) = x_0 \cos(\omega t + \varphi_x) \quad \text{und} \quad y(t) = y_0 \cos(\omega t + \varphi_y),$$

die Ellipsengleichung

$$(x/x_0)^2 + (y/y_0)^2 - 2xy \cos \Delta\varphi / (x_0 y_0) = \sin^2 \Delta\varphi, \quad \Delta\varphi = \varphi_x - \varphi_y$$

mit der Richtung der großen Halbachse

$$.5 \arctg(2x_0 y_0 \cos \Delta\varphi / (x_0^2 - y_0^2))$$

und den Halbachsenlängen

$$.5(x_0^2 + y_0^2 \pm (x_0^2 - y_0^2 + 4(x_0 y_0 \cos \Delta\varphi)^2)).$$

Die Berechnung von x_0^2 , y_0^2 und $x_0 y_0 \cos \Delta\varphi$ aus $x(t)$ und $y(t)$ erfolgt über die Kovarianzberechnung

$$\text{cov}(x, x) = \lim_{T \rightarrow \infty} 1/(2T) \int_{-T}^T x^2(t) dt$$

$$\text{cov}(y, y) = \lim_{T \rightarrow \infty} 1/(2T) \int_{-T}^T y^2(t) dt$$

$$\text{cov}(x, y) = \lim_{T \rightarrow \infty} 1/(2T) \int_{-T}^T x(t) y(t) dt$$

wobei die tiefgestellte "o" andeutet, daß es sich um einen Sonderfall von

$$\text{cov}_\tau(a, b) = \lim_{T \rightarrow \infty} 1/(2T) \int_{-T}^T a(t) b(t - \tau) dt$$

handelt.

Wegen der Definition der Kovarianz als Grenzprozeß mit unendlich langen Reihen, ist es praktisch nur möglich, eine genäherte Berechnung in einem endlichen Zeitfenster

durchzuführen. Dies ist auch deshalb sinnvoll, da trotz Schmalband-Filterung eine schwache Zeitabhängigkeit der Komponenten vorhanden ist, wohingegen die Definition der Kovarianz als Grenzprozeß von stationären Zeitreihen ausgeht. Somit wird die Kovarianz als

$$\text{cov}_0(a,b) = 1/(2n) \sum_{-n}^n a_n b_n w_n$$

berechnet, wobei w eine Fensterfunktion ist, die Randeffekte durch hartes Abschneiden an den Kanten des Analyseintervalls verhindern soll. Ein cos-Fenster und eine Intervalllänge von zwei Periodenlängen ergeben eine für die Praxis hinreichende Genauigkeit. Mit Hilfe der Kovarianzmatrix

$$\hat{C} = \begin{pmatrix} \text{cov}(x,x) & \text{cov}(x,y) \\ \text{cov}(y,x) & \text{cov}(y,y) \end{pmatrix}$$

läßt sich die Ellipsengleichung als $\hat{x}^T \hat{C} \hat{x} = \det(\hat{C})$ schreiben. Bringt man $\hat{C}$ durch die Transformation $\hat{R}^T \hat{C} \hat{R} = \hat{C}'$ auf Hauptachsenform, wobei $\hat{R}$ die Transformationsmatrix und $\hat{C}'$ die Diagonalmatrix ist, so geben die Eigenwerte die Halbachsenlängen und die Eigenvektoren die Richtung der Halbachsen an. Auf Grund der Relation

$$S_{xy}(f) = \int \text{cov}_t(x,y) \exp(2\pi i f t) dt$$

und des Parsevalschen Theorems

$$\int x(t)y(t) dt = \int X(f)Y^*(f) df$$

ist die Analyse der Kovarianzmatrix (Zeitbereich) und der Spektralmatrix (Frequenzbereich) insofern äquivalent, als die Richtungen der Ellipsen-Halbachsen mit den Richtungen minimaler Kohärenz übereinstimmen.

Da bei der Dispersions-Analyse die schmalbandgefilterten Zeitreihen als Zwischenergebnis vor der Berechnung der Momentan-Amplituden anfallen, liegt es nahe, diese abzuspeichern und für die anschließende Polarisations-Analyse zu verwenden. Zunächst wurde die Analyse für die Horizontal-Komponenten durchgeführt und nach der Drehung der NS- und EW-Komponente in die mutmaßliche Ausbreitungsrichtung der Rayleigh-Wellen und senkrecht dazu, auf die Radial- und Vertikal-Komponente angewendet. Eine anschauliche Darstellung der frequenz- und zeitabhängigen Polarisation wird durch die Zeichnung der Hodographen der schmalbandgefilterten Komponenten erreicht, wobei die Mitte der zu zeichnenden Seismogrammausschnitte durch die bereits in der Dispersionsanalyse verwendeten Gruppengeschwindigkeiten gegeben ist, und sich die Länge der Ausschnitte aus der Mittenperiode des Schmalbandfilters

festlegen läßt. Man gelangt so zu einer matrixartigen Darstellung wie bei der Dispersionsanalyse, nur daß statt den Momentanamplituden der Gabormatrix Hodographen gezeichnet werden. Abb. 11 zeigt die Dispersions-Polarisations - Matrix ("PDM") der Vertikal- und Radial-Komponente der theoretischen Seismogramme für das Modell "JM" . Zu den in den Hodographen dargestellten Ellipsen kann - wie beschrieben - das Halbachsen-Verhältnis und die Richtung der großen Halbachse berechnet werden. Beide Größen lassen sich zusammengefaßt in einer "Vektor-Matrix" darstellen, wobei statt den Ellipsen Vektoren gezeichnet werden, deren Länge proportional zur Exzentrizität (=1.- Elliptizität) der Ellipsen ist und deren Richtung gleich der Richtung der großen Halbachsen ist. Abb. 13 zeigt die der Dispersions- Polarisations- Matrix der Abb. 12 entsprechende Darstellung. Da bei der Berechnung der Elliptizität die Amplitudeninformation der Ausgangsdaten praktisch verloren geht, ist es sinnvoll, bei den Vektor- Diagrammen zusätzlich die Isolinien der Gabor-Matrix einer der eingerechneten Komponenten mit einzuzichnen.

2.3 Frequenz-Wellenzahl-Analyse

Prinzipielle Schwierigkeiten bereitet die Interpretation der Polarisationsanalyse zusammengesetzter Signale; es ist z.B. nicht möglich, zwischen einer zirkular polarisierten Welle und zwei linear polarisierten mit $\pi/2$ Phasenverschiebung zu unterscheiden, die aus 90 grd unterschiedlichen Richtungen kommen. Eine Trennung von Wellenanteilen verschiedener Richtungen und/oder Geschwindigkeiten ist nur möglich, wenn die Welle an verschiedenen Orten beobachtet wird, sodaß man Aussagen über die räumlichen Wellenzahlen machen kann. Die Frequenz-Wellenzahl-Analyse ("wKA") und die Maximum - Likelihood-Signalschätzung (High- Resolution- Methode genannt, "HRR") ermöglichen derartige Aussagen im Rahmen der durch die endliche Apertur der Geophonaufstellung bedingten Auflösung. Die Verfahren wurden von Capon ('69,70) eingehend untersucht und auf das Problem multipler Wege von Rayleigh-Wellen über das LASA-Array angewendet.

In der Array-Seismologie wird das Delay- and- Sum-Verfahren häufig zur Verbesserung des Signal-Störstands eingesetzt, wobei die Seismogramme f_i verschiedener Stationen um Zeitintervalle $t_i = \vec{s} \cdot \vec{x}_i$ verschoben addiert werden; $\vec{s}$ ist der Slowness-Vektor dessen Komponenten die reziproken Geschwindigkeitskomponenten des Signals sind,

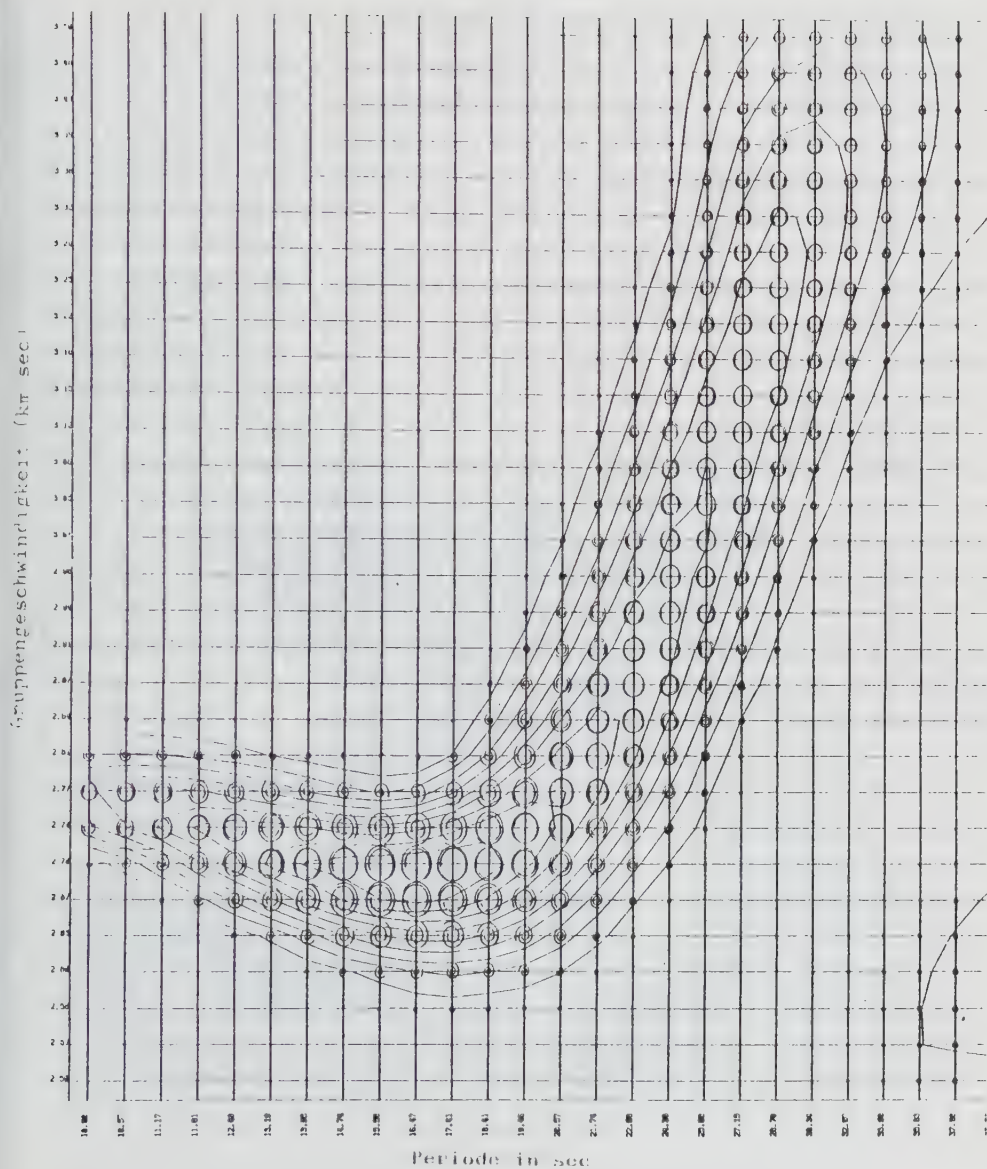


Abb. 11 Polarisations-Dispersions Matrix der Z- und R-Komponente
theoretischer Seismogramme für das Modell "JM".
Orientierung der Hodographen :



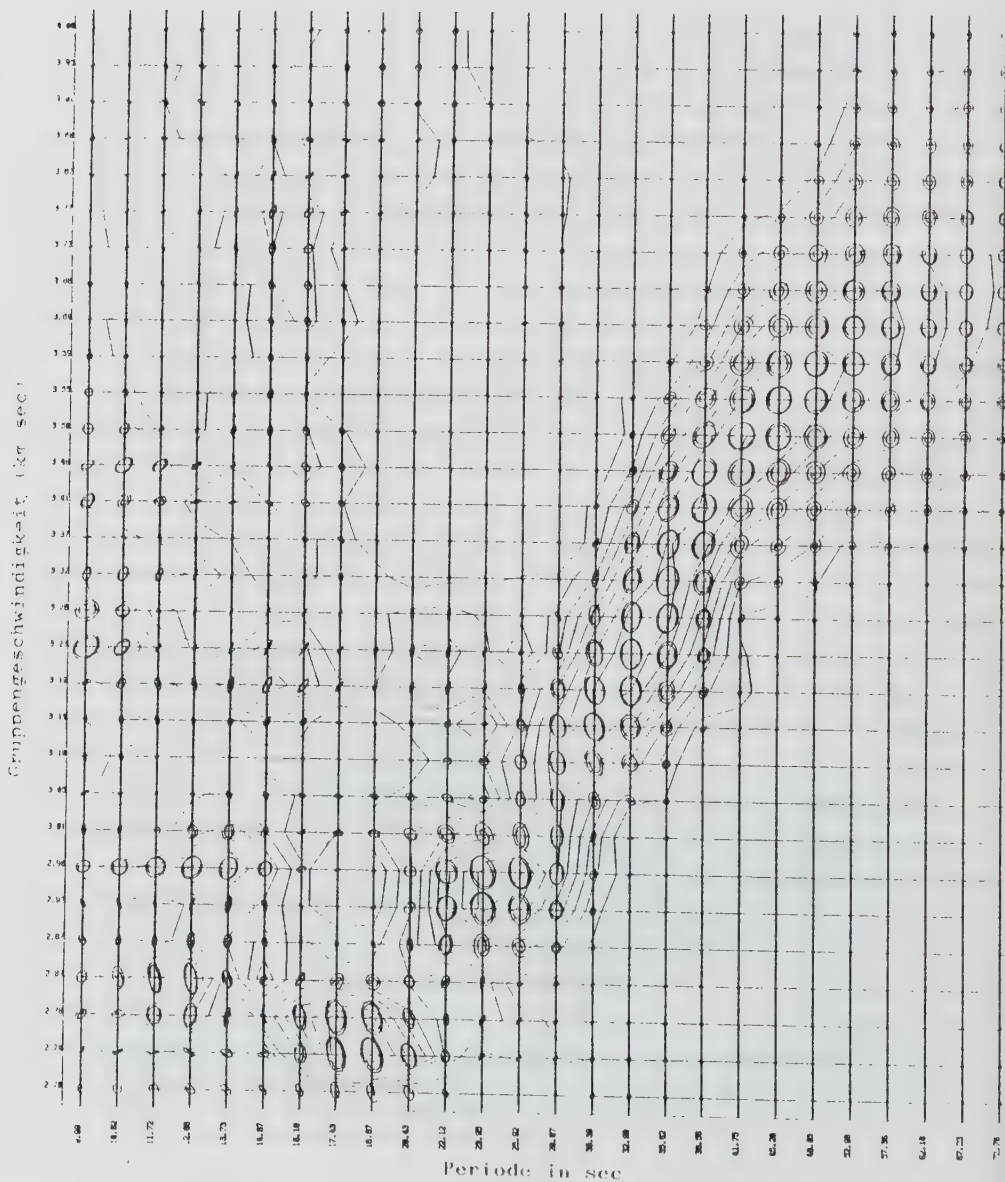


Abb. 12 Polarisations-Dispersions Matrix der Z'- und R-Komponente der Station AIZ eines Hokkaido-Bebens (23.1.'81)
Orientierung der Hodographen :

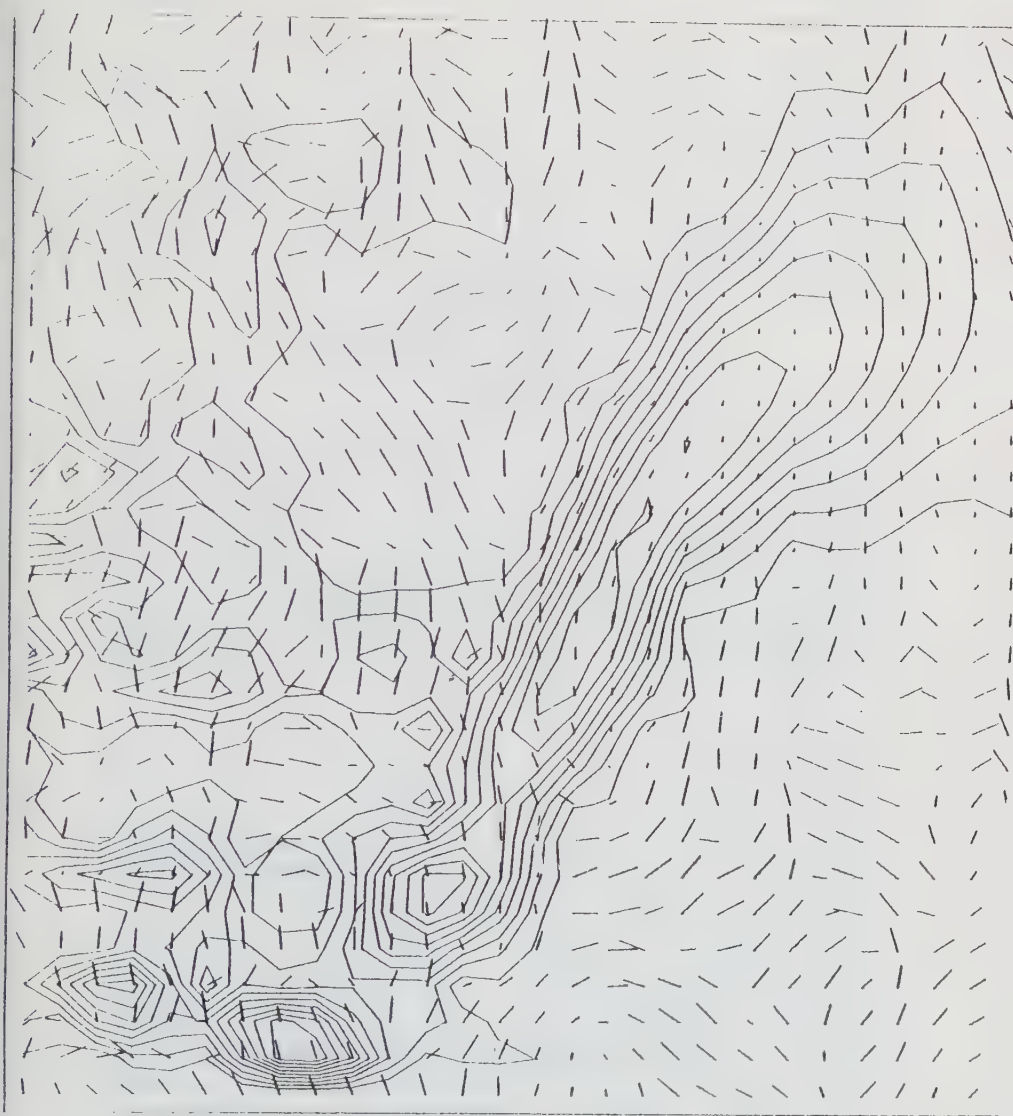


Abb. 13 Vektordarstellung zu Abb. 12

$\vec{x}_i$ sind die Ortsvektoren der Stationen. Mit dem Verschiebungssatz der Fourier-Transformation ergibt sich die Korrespondenz

$$\sum_i F_i(t + \vec{s} \vec{x}_i) \longleftrightarrow \sum_i F_i(\omega) \exp(i\omega \vec{s} \vec{x}_i) = \sum_j F_j(\omega) \exp(i\vec{k} \vec{x}_j) =: B;$$

$\vec{k}$ Wellenzahlvektor.

Das konventionelle Frequenz-Wellenzahl-Spektrum ist als Powerspektrum $P = BB^*$ definiert:

$$P = \sum_i F_i \exp(i\vec{k} \vec{x}_i) \cdot \sum_j F_j^* \exp(-i\vec{k} \vec{x}_j) =$$

$$\sum_{i,j} F_i F_j^* \exp(i\vec{k} (\vec{x}_i - \vec{x}_j)).$$

Der Faktor $F_i F_j^*$ ist nur signalabhängig, der Faktor $\exp(i\vec{k} (\vec{x}_i - \vec{x}_j))$ nur abhängig von der Geometrie der Geophonaufstellung. Der Ausdruck $\sum_{i,j} \exp(i\vec{k} (\vec{x}_i - \vec{x}_j))$ wird als Array-Antwortfunktion bezeichnet und gibt das Auflösungsvermögen (bzw. die Trennschärfe) für sich überlagernde Wellen verschiedener Wellenzahlen an. Bei unendlicher Apertur würde die Array-Antwort zu einem Dirac-Impuls im Wellenzahl-Raum entarten. Betrachtet man eine monochromatische Welle der Frequenz ω_0 und dem Wellenzahl-Vektor $\vec{k}_0$,

$$F_i(t) \sim \exp(i(\omega_0 t - \vec{k}_0 \vec{x}_i)),$$

so ergibt sich $F_i(\omega) = \delta(\omega - \omega_0) \exp(-i\vec{k}_0 \vec{x}_i)$ und

$$\text{für } P = \sum_{i,j} \delta(\omega - \omega_0) \exp(i(\vec{k} - \vec{k}_0) (\vec{x}_i - \vec{x}_j)),$$

was nichts anderes darstellt, als die um $\vec{k}$ verschobene Array-Antwort. Abb. 14 zeigt die Array-Antwort für das Gräfenberg-Array (vergl. Abb. 20).

In der elongierten Form erkennt man die Array-Geometrie wieder: die geringe Ost-West-Auflösung wird durch die geologisch bedingte geringere Erstreckung des Arrays in dieser Richtung verursacht. Neben dem Hauptmaximum sind Nebenmaxima vorhanden, die bei einer Überlagerung mehrerer Wellen eine Interpretation des Frequenz-Wellenzahl-Spektrums erschweren. Die Nebenmaxima werden bei dem signaladaptiven Maximum-Likelihood-Verfahren unterdrückt.

Maximum-Likelihood-Schätzungen sollen einen erwartungstreuen Schätzwert minimaler Varianz ergeben. Im Fall der Schätzung eines Signals in Gegenwart von Noise bedeutet dies, daß das Signal bei dem Schätzprozeß unverändert bleibt und daß, da die Varianz des Signals

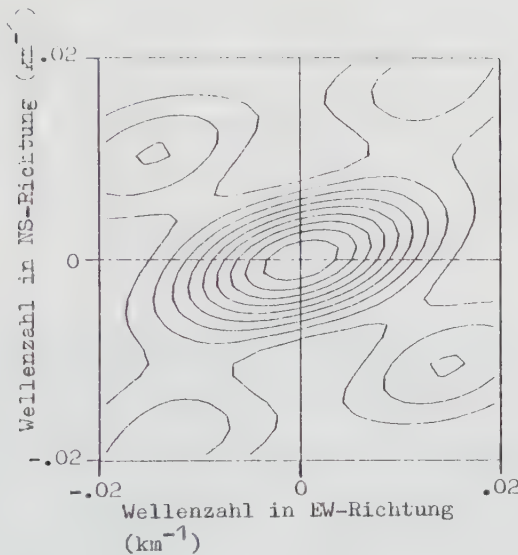


Abb. 14 Array-Antwort des GRF-Arrays

unverändert bleiben muß, der Beitrag des Noise zur Varianz der Zeitreihe minimiert wird. Hierzu wird das Delay- and-Sum- Verfahren auf das Filter- Delay - and - Sum - Verfahren erweitert, wobei im Frequenz- Wellenzahl- Spektrum noch die zunächst unbekannten Filtergewichte A hinzukommen

$$P^1 = \sum_{i,j} A_i F_i A_j^* F_j^* \exp(i\vec{k}(\vec{x}_i - \vec{x}_j))$$

$$=: \sum_{i,j} A_i A_j^* S_{ij}^1(\omega, \vec{k})$$

Je größer der (inkohärente) Noise-Anteil einer Station bei der betrachteten Frequenz ist, um so geringer soll ihr Gewicht bei der Summation sein. Aus der Forderung nach Erwartungstreue folgt sofort $\sum_i A_i = 1$, und aus der Forderung nach minimaler Varianz $\sum_{i,j} A_i A_j^* S_{ij}^1 = \min$. Diese

Minimierungsaufgabe unter einer Nebenbedingung wird mit der Methode des Lagrange-Multiplikators gelöst. Damit erhält man

ein Gleichungssystem für die Filtergewichte

$$\sum_j A_j S_{ij}^* = a$$

mit der Lösung

$$A_j = a \sum_i Q_{ij}^*, \text{ mit } Q_{ij}^* = S_{ij}^{-1}.$$

Wegen $\sum_i A_i = 1$ folgt $a = 1 / \sum_{i,j} Q_{ij}^*$.

Damit wird das Frequenz-Wellenzahl-Spektrum

$$\begin{aligned} P' &= \sum_i A_i^* \sum_j A_j S_{ij}^* \\ &= \sum_i A_i / \left(\sum_{i,j} Q_{ij}^* \exp(i\vec{k}(\vec{x}_i - \vec{x}_j)) \right) = \\ &= 1 / \left(\sum_{i,j} Q_{ij}^* \exp(i\vec{k}(\vec{x}_i - \vec{x}_j)) \right), \quad Q_{ij}^* = S_{ij}^{-1} \text{ inverse} \\ &\quad \text{Spektralmatrix.} \end{aligned}$$

Bei sehr geringem Noise gibt es Probleme bei der Inversion der Spektralmatrix, die jedoch durch Stabilisierungsmaßnahmen (Vergrößerung der Diagonalelemente) i.A. behoben werden können. Aus Abb. 15 wird die verbesserte Auflösung des HR-Verfahrens deutlich. Analysiert wurde ein Ausschnitt der Oberflächenwellen-Coda eines Bebens im Nord-Atlantik.

Grundlage des verwendeten Analyseprogramms ist eine von W. Hanka mir freundlicherweise zur Verfügung gestellte Subroutine.

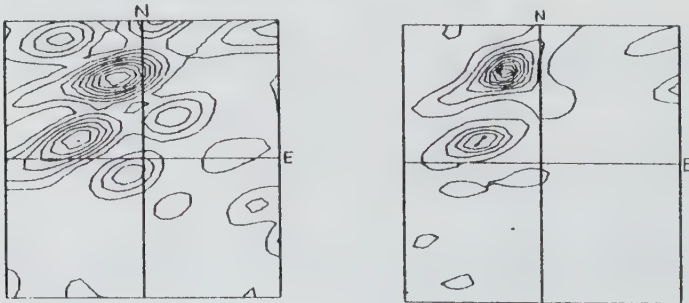


Abb. 15 Konventionelle und HR-Frequenz-Wellenzahl-Analyse

KAPITEL 3

Software zur digitalen Signalanalyse

Neue Fragestellungen in der Seismik, die mit Hilfe digitaler Signalverarbeitung gelöst werden sollen, erfordern i.A. ein Experimentierstadium, in dem geeignete Methoden gesucht werden. Diese werden dann zunächst an einem Datensatz beschränkten Umfangs erprobt, um bei hinreichend aussagekräftigen Ergebnissen zu Standardverfahren zu werden. Beim ersten Schritt treten häufig Kombinationen bekannter Verfahren und neuentwickelter Algorithmen auf. Die Gesamtentwicklung wird erleichtert, wenn die bekannten Verfahren wohldefinierte Schnittstellen aufweisen und Zwischenergebnisse ohne größeren Programmieraufwand kontrolliert werden können. Während im Experimentierstadium maximale Interaktionen mit dem ablaufenden Verarbeitungsprozeß wünschenswert sind, sollen Standardverfahren minimales Eingreifen des Benutzers erfordern. Die Berücksichtigung dieser Forderungen führte zu einem Konzept, das im Rahmen dieser Arbeit im "SIG" Programmpaket realisiert und erfolgreich eingesetzt wurde.

Eines der Prinzipien rationeller Software-Erstellung ist die Bewältigung der Problemkomplexität durch Zerlegung des Problems (Modularisierung) in Teilaufgaben geringerer Komplexität. Ein Modul besteht aus einer Hauptfunktion, deren Ausgabe ausschließlich von der Eingabe abhängt und aus den zugehörigen Datenstrukturen. Die Schnittstelle zwischen Modulen ist die Menge aller Annahmen, die die Module übereinander machen. Dazu gehören etwa Name, Bedeutung, Typ, Repräsentation und Wirkung von auszutauschenden Daten. Einfachheit von Schnittstellen ist ein Entwurfskriterium, das Einfachheit modularer Kommunikation fordert.

3.1 Kommando- und Kontrollsprache

Unter Kommandosprache versteht man die Sprache, die ein Benutzer verwendet, um das System zu der von ihm geforderten Aktion zu veranlassen. Bei wechselseitigem Austausch von Nachrichten spricht man von interaktiver Kommandosprache

(Dialogsprache). Der Sprachvorrat ist oft eine feste Menge von Kommandos syntaktisch einfacher Struktur. Die einfache Syntax ist eine Folge der geringen Abhängigkeit der Kommandos voneinander, Eingabe und Abarbeitung erfolgen sequentiell, so daß Ablaufstrukturen wie Schleifen, Sprünge, Unterprogramme etc. keine Rolle spielen. Derartige Ablaufstrukturen sind in mehr oder weniger syntaktisch reichhaltigen Kontrollsprachen gegeben. Kontrollsprachen können als Programmiersprachen aufgefaßt werden, deren Hauptaufgabe darin besteht, gemäß vorgegebener Ablaufstrukturen Kommandos an das System zu übermitteln.

Die recht allgemeine Forderung nach Benutzer-Freundlichkeit der Kommandosprache ist um so besser erfüllt, je besser die Sprache den Ausdrucksmöglichkeiten und Denkgewohnheiten des Benutzers angepaßt ist und je frühzeitiger und klarer Fehler diagnostiziert werden. Für untrainierte Benutzer soll das Dialogsystem selbsterklärend die aktive Rolle im Dialog übernehmen; für trainierte Benutzer soll der Dialog so knapp wie möglich gehalten werden können. Dies bedingt reichhaltige Möglichkeiten der Parametrisierung der Kommandos, weitreichende Abkürzungsmöglichkeiten, Erweiterbarkeit der Kommandosprache und Nutzung der durch die Kontrollsprache gegebenen Möglichkeiten.

Kontrollsprachen bestehen aus Kommandosequenzen, die an das System weitergeleitet werden sollen und aus Direktiven, die die Abfolge der Sequenzen festlegen. Dazu müssen bedingte Sprünge und logische Abfragen möglich sein. Viele Kontrollsprachen bieten darüber hinaus die Möglichkeit der Symbolmanipulation und -substitution. Im Gegensatz zu Dialogsprachen werden die Sprachelemente der Kontrollsprache i.A. vor ihrer Interpretation in einer Datei abgelegt, so daß bei ihrer Abarbeitung jede Benutzer-Interaktion unterbleiben kann.

Die Synthese von Teilalgorithmen kann auf verschiedene Weise bewerkstelligt werden. Die gängige Methode basiert auf der Verwendung von Unterprogrammen mit kompatiblen Parameterschnittstellen in einer neu zu erstellenden Unterprogrammumgebung. Dadurch ist gemeinhin der Ablauf der Teilalgorithmen festgelegt, die Teilergebnisse sind nicht unmittelbar kontrollierbar, jede Änderung im Ablauf erfordert eine Änderung der Unterprogrammumgebung, jedoch läßt sich der Datendurchsatz effizient gestalten.

In dem für das SIG Programmpaket gewählten Konzept werden die Unterprogramme, die die Teilalgorithmen repräsentieren durch Dialogroutinen, die deren Parameter-Schnittstellen versorgen, ergänzt und als

Kommandos interaktiv aufrufbar. Die Schnittstellen zwischen den Teilalgorithmen sind genormte Datenstrukturen, die als (Zwischen-)Ergebnisse auf dem Massenspeicher (Magnetplatten) vorliegen. Dadurch ist ein Pseudo-Pipeline-Betrieb möglich, bei dem die Ausgabe eines Programms als Eingabe für das nächste dient. Die verbesserten Interaktionsmöglichkeiten verschlechtern den Datendurchsatz, da jeder Teilalgorithmus die Daten vom Massenspeicher lesen und die verarbeiteten Daten zurückschreiben muß. Ein fester Ablauf von Teilalgorithmen läßt sich leicht unter Verwendung einer Kontrollsprache erreichen.

3.2 Technische Randbedingungen

Das Programmpaket wurde an dem DLC-Rechner PDP 11/40 unter dem Multiuser- Betriebssystem RSX11M/V3.2 implementiert. Die zu berücksichtigende Hardware Konfiguration besteht aus zwei musealen 800 BpI Magnetbandgeräten für langfristige Datenhaltung, sechs 4 Mbyte Magnetplatten von denen de facto jedoch höchstens zwei für die mittelfristige Datenhaltung verfügbar sind, einem Trommelplotter und verschiedenen z.T. grafikfähigen Terminals.

Neben der üblichen Software-Unterstützung von Betriebssystemen stellt insbesondere die Kontrollsprache des "Indirect Command Processor" eine wesentliche Erleichterung bei der Realisierung des vorgestellten Softwarekonzepts dar.

Die Berechnungsteile der Programme wurden in Fortran programmiert, der zum Zeitpunkt der Entwicklung einzigen vom Hersteller unterstützten höheren Programmiersprache. Die Dialogteile wurden wegen der relativ komplizierten Ablaufstruktur in Ratfor programmiert und von einem Vorübersetzer in Fortran transformiert.

3.3 SIG Kommandosprache

Die Syntax der Kommandos lehnt sich weitgehend an die vom Nutzer bei der Bedienung des Rechners ohnehin zu erlernende RSX-MCR-Kommandostruktur an. Fast alle SIG-Programme verarbeiten durch Parameter gesteuert Eingabedateien zu Ausgabedateien. Damit bietet sich folgende Kommandostruktur an:

CMD Ausgabe=Eingabe,Parameter

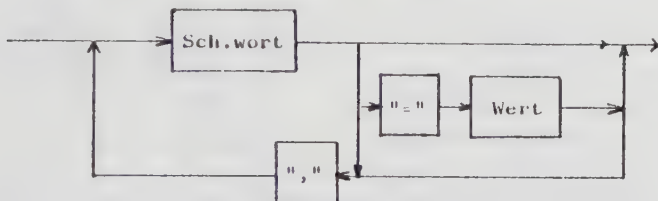
mit der Bedeutung:

CMD

Kommandoname

Trommelplotter "XY;" das Seismogramm mit dem voreingestellten Namen "SEISIN.DAT;1" in dem Zeitausschnitt von -10. sec bis 21.3 sec gezeichnet wird, wobei alle weiteren Parameter, wie etwa Maßstabs-Angaben in der Datei "PARA.PLT" angegeben sind.

Wird keine Parameterdatei spezifiziert, so werden die benötigten Größen i.A. im Frage-Antwort-Modus am II: abgefragt, falls sie nicht auf der Kommandozeile durch "Parameter=Wert" (oder "Parameter") angegeben werden. Wird eine Parameterdatei spezifiziert (-Modus), so kann eine darin angegebene Größe durch ihre explizite Angabe auf der Kommandozeile für diesen Aufruf überschrieben werden. Die Parameterdatei muß eine Zeile der Form



sein. Sie kann editiert oder von den Kommandos selbst erzeugt werden, indem

CMD @Parameterdatei

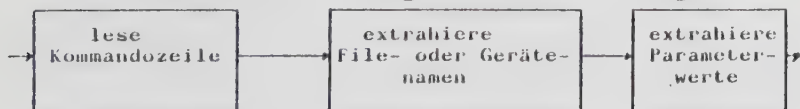
angegeben wird. Es erfolgt dann die Eingabe im Frage-Antwort-Modus ohne Überprüfung der Größen. Eine Eingabe der Form "CMD ?" bewirkt die Ausgabe der Syntax für das entsprechende Kommando und der möglichen Schlüsselworte einschließlich möglicher Voreinstellungen.

Der genaue Syntaxgraph ist in Abb. 16 wiedergegeben.

Abweichungen vom aufgeführten Verhalten (z.B. keine Parameterdatei erlaubt) werden bei der jeweiligen Kommando-Beschreibungen angegeben. Diese erfolgt einheitlich in Tabellenform wie z.B. in Abb. 17.

Zur automatischen Abarbeitung sich wiederholender Kommandosequenzen mit sich wenig verändernden Parametern wurde ein Programm in Kontrollsprache geschrieben, das die Kommandosequenz solange wiederholt, bis eine Parameterliste erschöpft ist.

Die Grobstruktur der Dialogroutinen ist wie folgt:



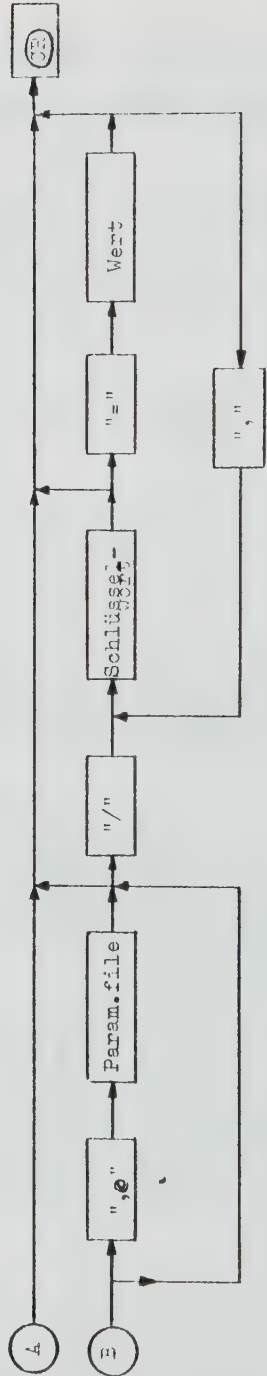
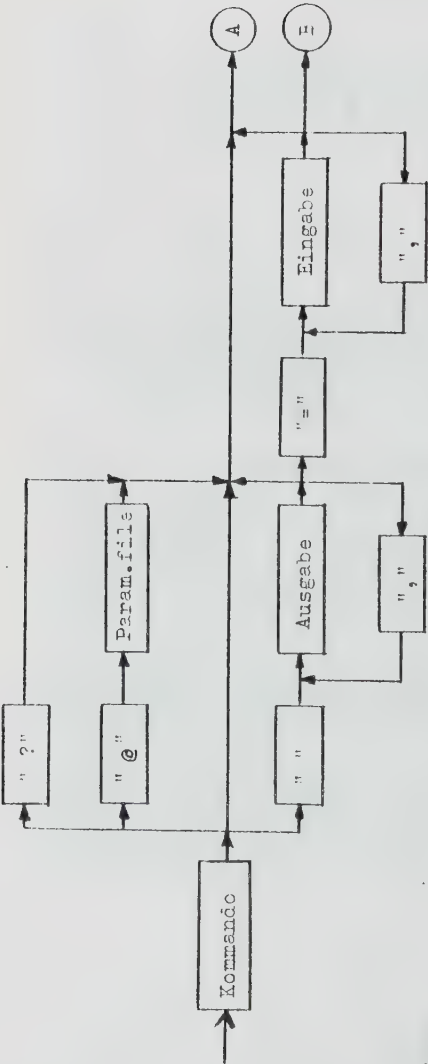


Abb. 16 Syntaxgraph der SIG-Kommandos

```

KOMMANDO      :      ' FLT '
NOTIKER UND   :
KURZNAMEPATENT: W. Greders      25.3. 82

ZUECK        : Zeichnen von Seismogramm-Ausschnitten
ARBEITSWEISE : Seismogramm-Ausschnitte werden linear verbunden
GRÖSSE       : FLT (Plotdev) (seismo)(x@y@z@t) (p@r@w@l@l@l)
              oder
              FLT @parist

```

FILENAME	VOREINSTELLUNG	TYPE
Plotdev	XY:	XY: oder T:
seismo	SEISM.DAT1	SEISMODIGRAMM
parist	---	TEXT

PARAMETER	TYPE	GRENZEN	VOREINSTELLUNG	IFRAGE	BEDEUTUNG
ANF-	R	STIM<ANF<=	falls 8 - Mode	+	Intervallanfang in
		ENDTIM	ANF-STIM		sec
END-	R	ANF <END<=	falls 9 - Mode	+	Intervallende in
		ENDTIM	END-ENDTIM		sec
AMPL-	R	---	---	+	Amplitudenmax in cm
MASS	R	---	---	+	Massstabsfaktor
CLIF-	R	'0.	1000.	+	Zeichnung erfolgt
					nur zwischen +CLIF
					cm
CHASS-	R	0.	---	+	Zeitenstab in cm/sec
SECH-	R	-0.	0. (keine Marken)	+	Markieren jeder
					SECH'len sec

```

FEHLER UND UNZU-
LAENGLICHKEITEN : ---

```

```

BENÖTIGTE MODULE : FLT,CHNFLT,SEIFLT,SIZE,[1,70]FLTLIB,PIO

```

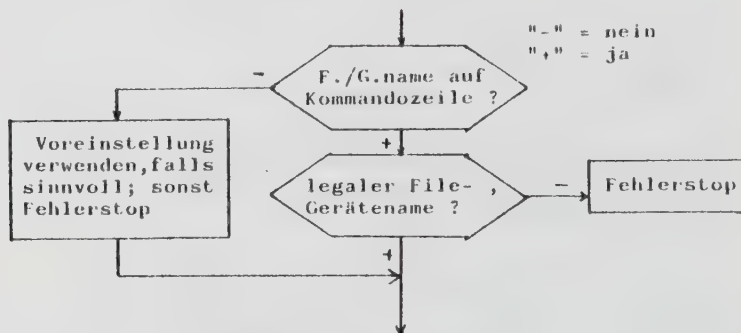
```

REVISIONEN      : ---

```

Abb. 17 Beispiel einer Beschreibung eines SIG-Kommandos

und in nächster Verfeinerung der repetitiven Teile
 "extrahiere File- oder Gerätenamen"



und "extrahiere Parameterwert" s. folgende Seite.

Die gleichbleibende Struktur der repetitiven Teile legt eine tabellengesteuerte Implementierung des Dialogs nahe. Dabei wird ähnlich wie bei einem Unterprogramm nur die feste Struktur programmiert und die variablen Teile werden einer Tabelle entnommen. Dem widerspricht die Plausibilitäts-Prüfung nach der Dekodierung der Parameterwerte (frühzeitige Fehlererkennung), die dann während der Programmausführung interpretiert werden müßte. Statt dessen wird die Ablaufstruktur als Schablone von einem primitiven Programmgenerator zu einem übersetzbaren Programmteil expandiert, wobei die variablen Teile vor der Übersetzung im Dialog vom Programmierer erfragt und an die entsprechenden Stellen der Schablone eingesetzt werden.

3.4 Datenstrukturen

Die kleinste gemeinsame Schnittstelle der Kommandos sind die Datenstrukturen auf der Eingabe- und Ausgabeseite. Die beiden wesentlichen Datenstrukturen beziehen sich auf Daten im Zeit- und Frequenzbereich.

Die Daten im Zeitbereich (i.A. Seismogramme) müssen im sog. MUC-Format vorliegen. Dabei ist den Daten ein Kopfblock vorangestellt, der ihre eindeutige Identifikation ermöglicht und der begleitende Information enthält. Eine verbesserte und erweiterte Strukturierung des ursprünglich für refraktionsseismische Daten vorgesehenen Kopfblocks mit der Dokumentation der Verarbeitungsgeschichte konnte nicht durchgesetzt werden. Dem Kopfblock folgen unformatiert.

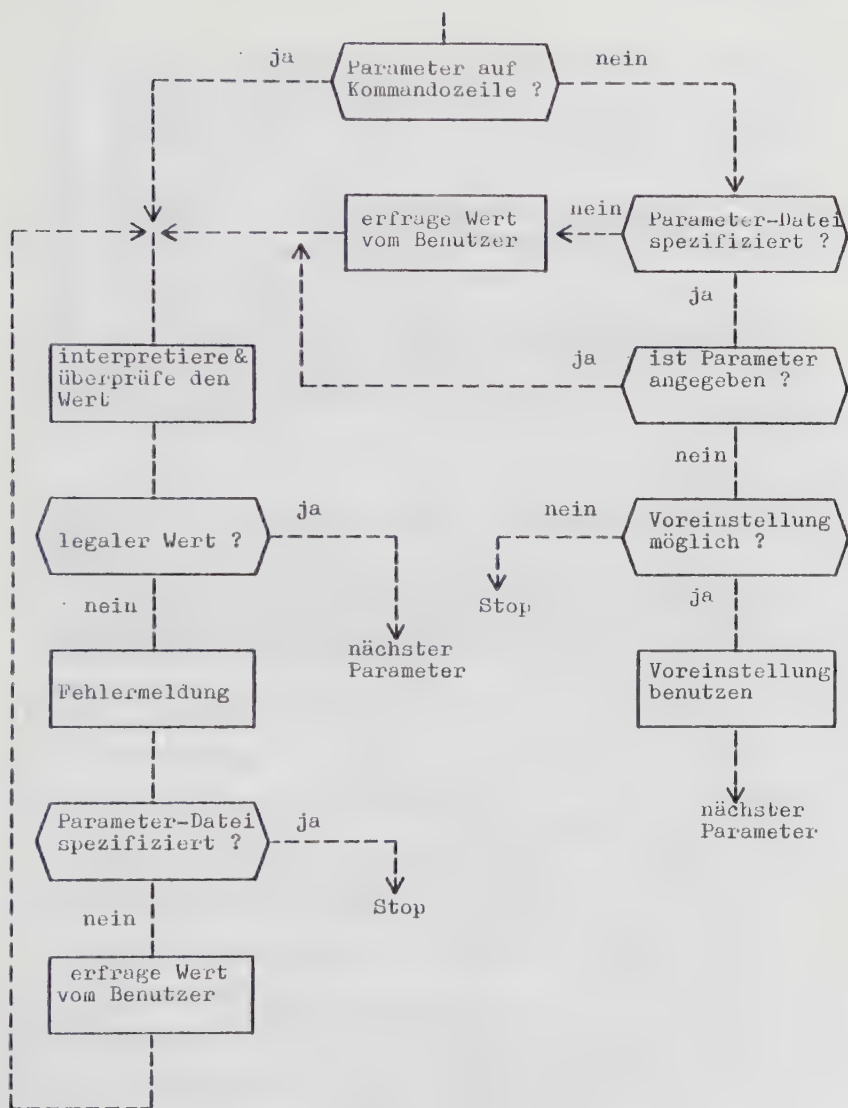


Abb. 18 Ablaufschema des Programnteils "extrahiere Parameterwert"

geschriebene Datenblöcke mit je 1600 Werten, wobei der letzte Block nicht vollständig mit Daten belegt zu sein braucht. Auf Magnetband gespeichert liegen die Daten als ganzzahlige Werte vor, auf Platte als reelle Zahlen. Da die Bänder unter Umgehung der Dateiverwaltung des Betriebssystems geschrieben und gelesen werden, sind für einen entsprechenden Datentransfer eigene Kommandos nötig. Die Datenblöcke auf Platte sind im Direktzugriff (Random-access) ansprechbar.

Die Daten im Frequenzbereich sind ebenfalls mit einem Kopfblock versehen, aus dem u.A. hervorgeht, aus welchen Daten sie entstanden sind. Zugleich ist im Kopfblock die Länge der Datensegmente vermerkt und welcher Art sie sind (komplexe Spektren, Powerspektren, Phasenspektren, Filterdurchlaß, etc.). Die folgenden unformatierten Datensegmente sind sequentiell auf Platte gespeichert.

3.5 Implementierungsumfang des SIG-Programm-Pakets

Derzeit stehen folgende Verarbeitungs-Programme zur Verfügung:

FIL	Berechnung von FIR-Filterkoeffizienten für Hoch-, Tief-, Bandpässe und Bandsperren mit Kipfmüller-, Ormsby- und Martin-Graham-Flanken; optionale Fensterfunktionen: Bartlett-, Hanning-, Hamming- und Blackman-Fenster.
GSS	Berechnung von Gauss - Tiefpaß- und Bandpaß- Filterkoeffizienten.
PLY	Berechnung von Filterkoeffizienten durch cos-Transformation eines im Frequenzbereich spezifizierten Polygons.
CTF	Berechnung von Filterdurchlaßkurven durch cos-Transformation der Filterkoeffizienten.
HIL	Berechnung von Filterkoeffizienten zur nichtrekursiven Hilbert-Transformation.
CNV	Segmentierte Faltung von Seismogrammen mit FIR-Filterkoeffizienten und Möglichkeit zur Datendezimierung.
FFT	Schnelle Fourier-Transformation von Seismogrammausschnitten mit einstellbarer Verschiebung des Ausschnitts und variablen Fensterflanken.
SPK	Berechnung und optionale Mittelung von Amplituden- bzw. Powerspektren.
CRS	Berechnung von Power- bzw. Kreuzspektren mit optionaler gleitender oder segmentweiser Mittelung.
COH	Berechnung der Kohärenz aus den mit CRS berechneten Power- und Kreuzspektren.
WIN	Berechnung eines approximierten Wiener-Filters aus den Noise- und Signal+Noise-Spektren.
CAL	Arithmetische Verknüpfung von 1-3 Seismogrammen zu einem neuen.
ROT	Koordinatendrehung von Seismogrammen.
COV	Berechnung der Auto- oder Kreuzkovarianz in einem gleitenden Fenster.

Graphikprogramme:

PLT	zeichnet Seismogramme.
HOD	zeichnet Bahnkurven (Hodographen) zweier Seismogramme.
TRA	zeichnet zeitlich konsekutiv Hodographen.

SPP zeichnet Spektren oder Filterdurchlaßkurven in linearem oder logarithmischen Maßstab.
TXF zeichnet Texte
MOV bewegt den Zeichenstift zu einem neuen Koordinaten-Ursprung.

Dienstprogramme:

GET transferiert Seismogramme von Band auf Platte.
PUT transferiert Seismogramme von Platte auf Band.
GTM wandelt Gräfenberg-Daten ins MUC-Format.
INF gibt die Kopfblock-Information von Seismogrammen in lesbarer Form aus.
MTD gibt die Kopfblock-Information von Seismogrammen auf Magnetband in lesbarer Form aus (Inhaltsverzeichnis).
VAL druckt Seismogramm-Ausschnitte in lesbarer Form.
TBL druckt Spektral-Dateien in lesbarer Form.
XTR sucht Minimum und Maximum in einem Seismogramm-Ausschnitt.
CUT blockt einen Ausschnitt eines Seismogramms in ein neues um.

Alle anderen für diese Arbeit verwendeten Programme entsprechen nicht in vollem Umfang der SIG-Spezifikation und sind deshalb hier nicht aufgeführt.

In zwei Unterprogramm-Bibliotheken sind die Module zusammengefaßt, die zur Programmierung des Dialogteils notwendig sind, und die die graphische Ausgabe auf dem Trommelplotter und dem Bildschirm ermöglichen.

KAPITEL 4

Beobachtungen

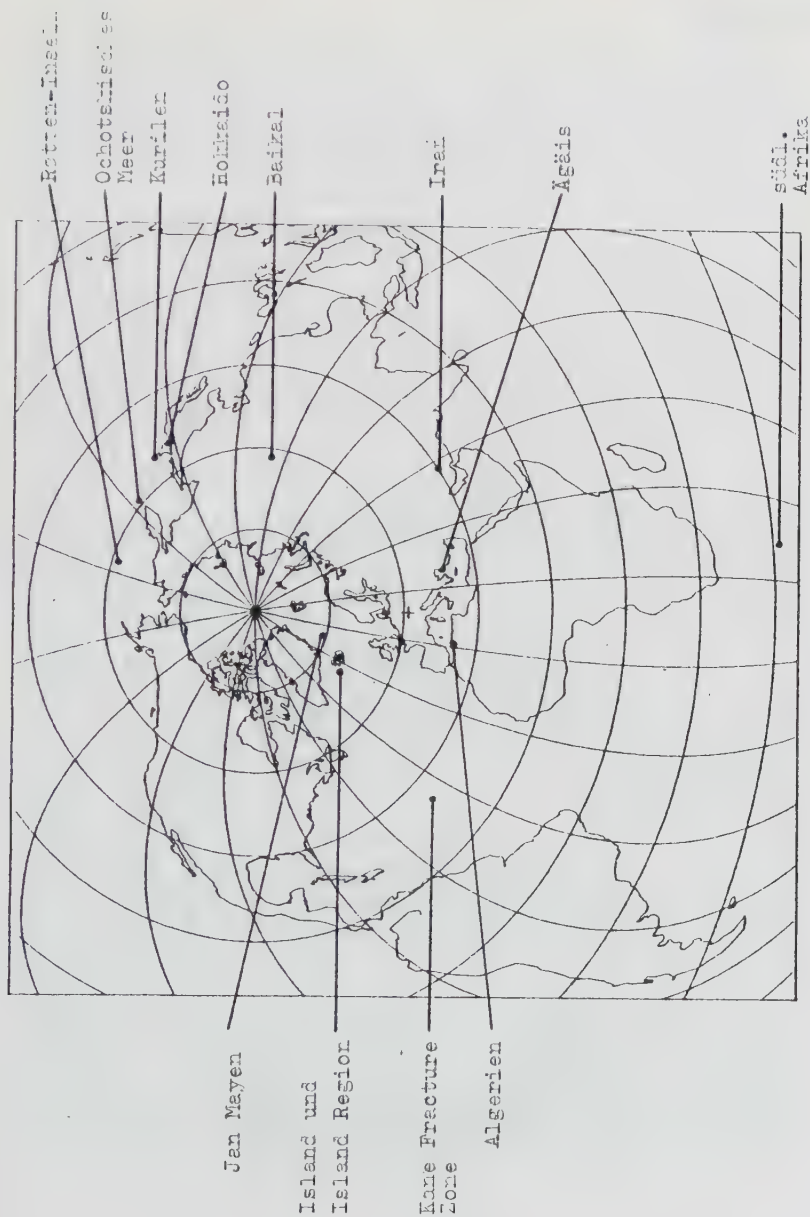
4.1 Quellen der analysierten Ereignisse und Registrierung

Die zu untersuchenden Ereignisse wurden so ausgewählt, daß azimut-bedingte Einflüsse beobachtbar sein sollten, aber auch die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse bei bestimmten Azimuten untersucht werden kann. Eine Liste der Ereignisse ist in Tab. S. 4-2 wiedergegeben. Abb. 19 zeigt die Epizentren in einer azimutal-äquidistanten Weltkarte mit Gräfenberg im Zentrum, da die verwendeten Daten im Seismologischen Zentral-Observatorium Gräfenberg (GRF) registriert wurden. Das Gräfenberg-Array besteht aus 19 Breitbandseismometern (Wieland, Streckeisen 83), darunter drei 3-Komponenten-Stationen, die auf dem schwäbisch-fränkischen Jura aufgestellt sind (Abb. 20).



Abb. 20 Karte der GRF-Geophone

Das Array ist in drei Subarrays A, B und C aufgeteilt, wobei die 3-K-Stationen als Subarray-Zentralen dienen, denen je 3 bzw. 4 Vertikal-Seismometer zugeordnet sind. Das Plateau



Azimuthal-Equidistante Projektion mit den Epizentren
der untersuchten Beben

Quell-Region	Datum	Zeit	Breite	Laenge	Mb, Ms
Rat Islands	30.1.81	8:52:44.1	51.74 N	176.27 E	0.3, 7.0
Ochotsk. Meer	23.8.81	12:00:26.5	48.72 N	157.39 E	6.0, 5.9
Kurilen	2.9.81	5:35:44.8	43.02 N	147.02 E	0.0, 0.0
Hokkaido	23.1.81	4:58:31.5	42.52 N	142.12 E	0.3, 6.7
Baikal	22.5.81	9:51:20.0	52.00 N	105.76 E	5.1, 5.0
Iran	11.6.81	7:24:25.2	29.91 N	57.72 E	0.1, 0.7
Aegaeis	14.6.79	11:44:45.1	38.70 N	26.57 E	5.9, 5.7
Suedl. Afrika	11.11.80	10:36:57.7	51.49 S	28.98 E	0.1, 6.7
Algerien (1)	7.12.80	17:37:05.8	36.06 N	1.30 E	5.3, 5.7
Algerien (2)	1.2.81	13:19:59.2	36.44 N	1.05 E	5.5, 5.7
Kane Frac. 2.	26.3.80	20:43:36.4	23.86 N	45.57 W	5.8, 0.3
Island (1)	12.8.80	12:11:43.0	64.09 N	17.33 W	5.3, 5.2
Island (2)	20.8.80	15:05:58.4	62.85 N	25.16 W	4.4, 4.0
Island Region	20.8.80	14:25:38.0	62.77 N	25.30 W	4.8, 4.6
Jan Naven	20.11.79	17:30:01.5	71.13 N	8.16 W	5.4, 5.4

Tabelle der untersuchten Ereignisse

der Geschwindigkeits- Übertragungsfunktion der Seismometer reicht von 5 Hz bis 20 sec. Die Daten werden mit 20 Hz abgetastet und via Modem in der Datenzentrale in Erlangen als 16-bit-floating-point Werte gemultiplext auf Band aufgezeichnet. Der Dynamikbereich beträgt 138 dB. Näheres ist der Arbeit von Harjes und Seidl (1978) zu entnehmen.

4.2 Verarbeitung und Simulations-Studien.

Vor der Analyse der Oberflächenwellen wurden die Daten vom GRF- in das MUC- Format gewandelt, mit einem FIR (Finite-Impuls-Response)-Filter auf Frequenzen 1 Hz beschränkt und mit einem Faktor 1:10 neu abgetastet. Die neu abgetasteten Daten wurden gezeichnet und danach der Perioden- und Geschwindigkeits-Bereich für die PDA festgelegt. Diese erfolgte zunächst an den Horizontalkomponenten der 3-K-Stationen. War aus den Polarisations- Dispersions- Matrizen (PDMs) die Polarisations-Richtung der Rayleigh- Wellen klar zu erkennen, so wurden die E-W und die N-S Komponenten entsprechend diesem Winkel in eine Radial-(R) und Transversal-(T) Komponente gedreht. Anderenfalls wurde als Drehwinkel das geographische Azimut gewählt. Da theoretisch zumindest im isotropen Medium die Polarisationsrichtung mit der Ausbreitungsrichtung der Rayleigh-Wellen übereinstimmt, wurde die Ausbreitungsrichtung in nachhinein mit der w-k-Analyse der Z-Komponenten des Arrays kontrolliert.

Der Fehler der Elliptizität durch Fehlorientierung der Horizontal-Komponenten ist von zweiter Ordnung (bei 5 grd Fehlorientierung 1% nach unten), falls sich die Rayleigh- und Love-Welle nicht in dem zu dem Elliptizitätswert gehörenden Zeit- und Frequenz-Intervall überlagern. Bei einer Überlagerung ist der Fehler am größten, wenn die Wellen in Phase sind, da dann der Love- Wellenanteil an der Radialkomponente von gleicher Ordnung wie die Fehlorientierung ist. Unter der zusätzlichen Annahme, daß die horizontalen Amplituden der Wellentypen gleich groß sind, bewirkt eine Fehlorientierung von 5 grd einen Fehler der Elliptizität von ca. 8 % nach oben. Zur Verdeutlichung des Effekts wurde in Abb. 21 die PD-Matrix der R- und T-Komponente der synthetischen Seismogramme des Modells "JM" gezeichnet. Bei der Periode 25.68 sec sind, - der linearen Polarisation nach -, die Love- und Rayleigh-Welle in Phase. Abhängig von den zeitlich sich verändernden Amplituden beobachtet man eine sich verändernde Polarisationsrichtung. Bei der Periode 32.02 sec sind Love- und Rayleigh-Wellen etwa 90 grd außer Phase, sodaß die Love-Welle zwar eine Öffnung der Polarisations-Ellipse bewirkt, jedoch die

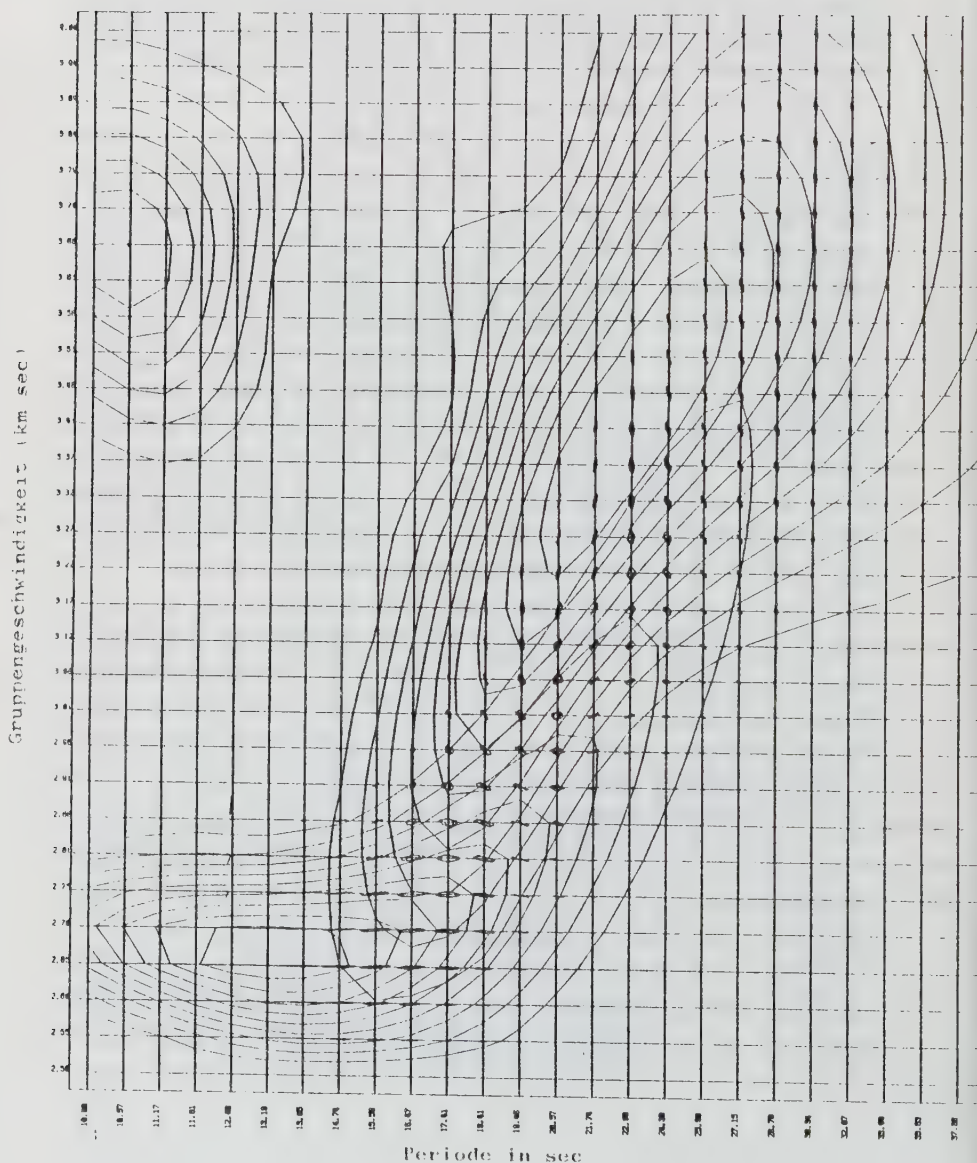


Abb. 21 Polarisations-Dispersions-Matrix der H-Komponenten
theoretischer Seismogramme für das Modell "JM".
Orientierung der Hodographen :



Halbachsen-Richtung nahezu unbeeinflusst läßt. Als Maß für die Interferenz der Wellentypen kann die zeitliche und periodenabhängige Konstanz der Polarisation genutzt werden.

Nach der Drehung in die vermeintliche Radial- und Transversalrichtung wurden die R- und Z-Komponenten PD-analysiert und die Gabor-Matrix für die T-Komponente berechnet. Die Polarisations-Parameter der Schwingungsellipsen wurden ausgedrückt und die daraus zu entnehmenden Elliptizitäten, die den jeweiligen Gruppengeschwindigkeiten entsprechen, gegen die Periode aufgetragen. In der Zusammenschau der horizontalen und saggitalen PD-Matrix wurden die Zeitfenster für die w-k-Analyse so festgelegt, daß bei klaren Polarisations-Verhältnissen in der Saggital-Ebene das durch die niedrigste Isolinie bestimmte Geschwindigkeits- (Zeit-) Fenster gewählt wurde; sonst wurde versucht, das Zeitfenster durch relativ gleichbleibende Polarisation und relativ große Amplituden in den PD-Matrizen festzulegen. Zum Teil wurden die Z-Komponenten vor der Verarbeitung noch mit einem 10-sec-Tiefpaß gefiltert. Markante Wellengruppen in der sog. Coda der Oberflächenwellen wurden ebenfalls w-k-analysiert, um festzustellen, ob es sich um lateral refraktierte Wellenteile handelt. Eines der Hauptanliegen der w-k-Analyse war festzustellen, ob es sich um eine oder mehrere sich über mehrfache Wege ausbreitende Wellen handelt. Für eine grobe Abschätzung des Auflösungsvermögens der w-k-Analyse wurde ein vereinfachendes theoretisches Beispiel gerechnet. Zunächst wurden für das Modell "OCII" (Abb. 4c) theoretische Z- und R- Seismogramme für eine Entfernung von 4000 km mit einem Programm von R. Kind (1979) gerechnet. Dieses wurde mit einer angenommenen mittleren Geschwindigkeit von 3 km/sec und einem Azimut von 35 grad E entsprechend den Koordinaten der Geophone des GRF-Arrays zeitlich verschoben. Die Montage ist in Abb. 22 wiedergegeben. Nach dem gleichen Verfahren wurde ein Datensatz mit einer mittleren Geschwindigkeit von 3.2 km/sec und einem Azimut von 47 grad E erstellt. Beide Datensätze wurden zeitverschoben so addiert, daß das erste simulierte Wellenfeld einen 10 % kürzeren Laufweg und eine .6 mal so große Amplitude aufweist. Das Ergebnis ist die Montage in Abb. 23. Von allen drei Datensätzen wurde der quasiperiodische Anteil bei einer Periode von 25 sec w-k-analysiert. Sowohl das klassische als auch das HR-Verfahren geben die Richtung der einzelnen Wellenfelder exakt wieder, können jedoch die Überlagerung der beiden Felder als solche nicht auflösen. Auch bei der Analyse der Airy-Phase des zusammengesetzten Feldes erfolgt keine Trennung der Felder, jedoch fällt die Streuung der Richtungen bei verschiedenen Perioden auf. Die Schlußfolgerung aus dem Simulations-Experiment ist, daß

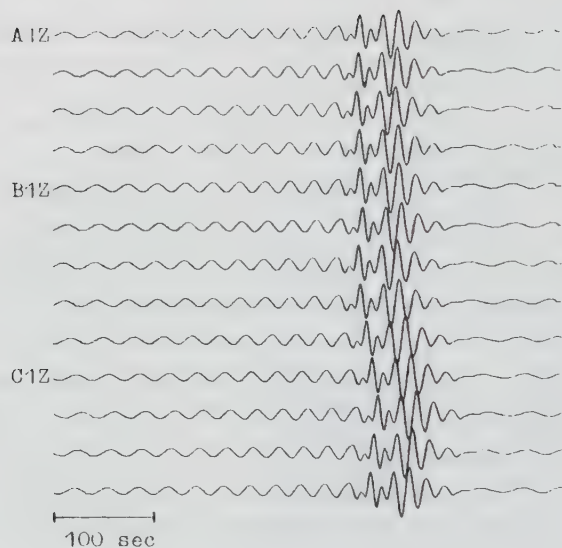
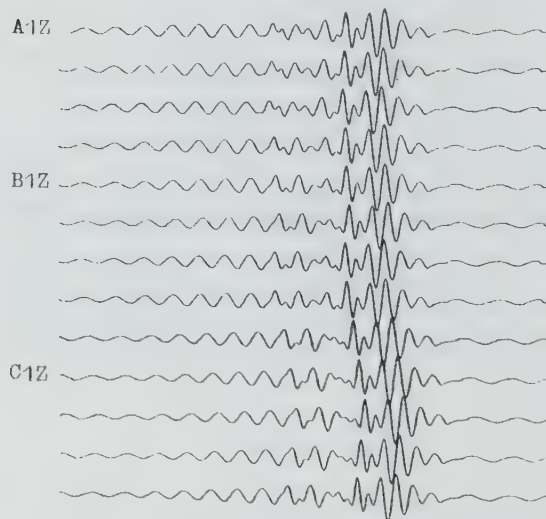


Abb. 22 Simuliertes Wellenfeld am GRF-Array

Abb. 23 Simuliertes Wellenfeld überlagelter Wellen
am GRF-Array .

sicher eine Ausbreitung über mehrfache Wege erfolgt ist, wenn die w-k-Analyse getrennte Maxima aufweist, man jedoch nicht sicher sein kann, daß keine derartige Ausbreitung erfolgt ist, wenn nur ein Maximum zu beobachten ist. Unter Vernachlässigung des Einflusses der unterschiedlichen Azimute wurden auch die Auswirkungen der Überlagerung auf die Ergebnisse der PDA untersucht. In Abb. 24 sind oben die R- und Z-Komponente eines Wellenzugs, unten die Komponenten des zusammengesetzten Wellenzugs gezeichnet.

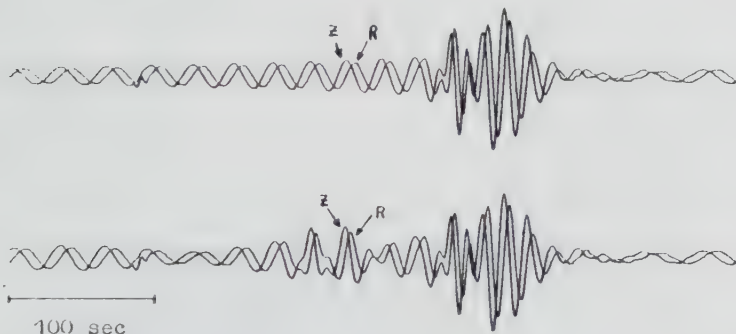


Abb. 24

Die langperiodischen Schwingungen nach der Airy-Phase sind durch Aliasing bei der Berechnung der theoretischen Seismogramme bedingt. Abb. 11 zeigt das Ergebnis der PDA des ungestörten Wellenzugs, Abb. 25 das der überlagerten Wellenzüge. Während die durch die Überlagerung entstandenen Schwebungseffekte deutlich erkennbar sind, zeigt sich kein erkennbarer Einfluß auf die Polarisierung. Vermeintliche Schwebungs-Minima in der Gabor-Matrix können jedoch auch herdbedingt sein. Die Amplitudenmodulation kann einerseits durch das zeitliche Verhalten des Bruchvorgangs erreicht werden, andererseits aber auch durch die Herdgeometrie bewirkt sein (s. z.B. Panza et al. '73). Der Einfluß der Herdgeometrie wurde für das oben verwendete Modell "OCH" mit Hilfe theoretischer Seismogramme untersucht, wobei die Herdfläche die Winkel $\lambda=90^\circ$, $\mathcal{S}=45^\circ$, $\varphi=90^\circ$, (vorher $\lambda=45^\circ$, $\mathcal{S}=90^\circ$, $\varphi=90^\circ$)^{*} einschließt. Das Ergebnis der PDA der Z- und R-Komponente zeigt Abb. 26, wobei ein relativ breites Amplitudenminimum bei Perioden um 22 sec auftritt. Die großen Amplituden bei langen Perioden und geringer

*



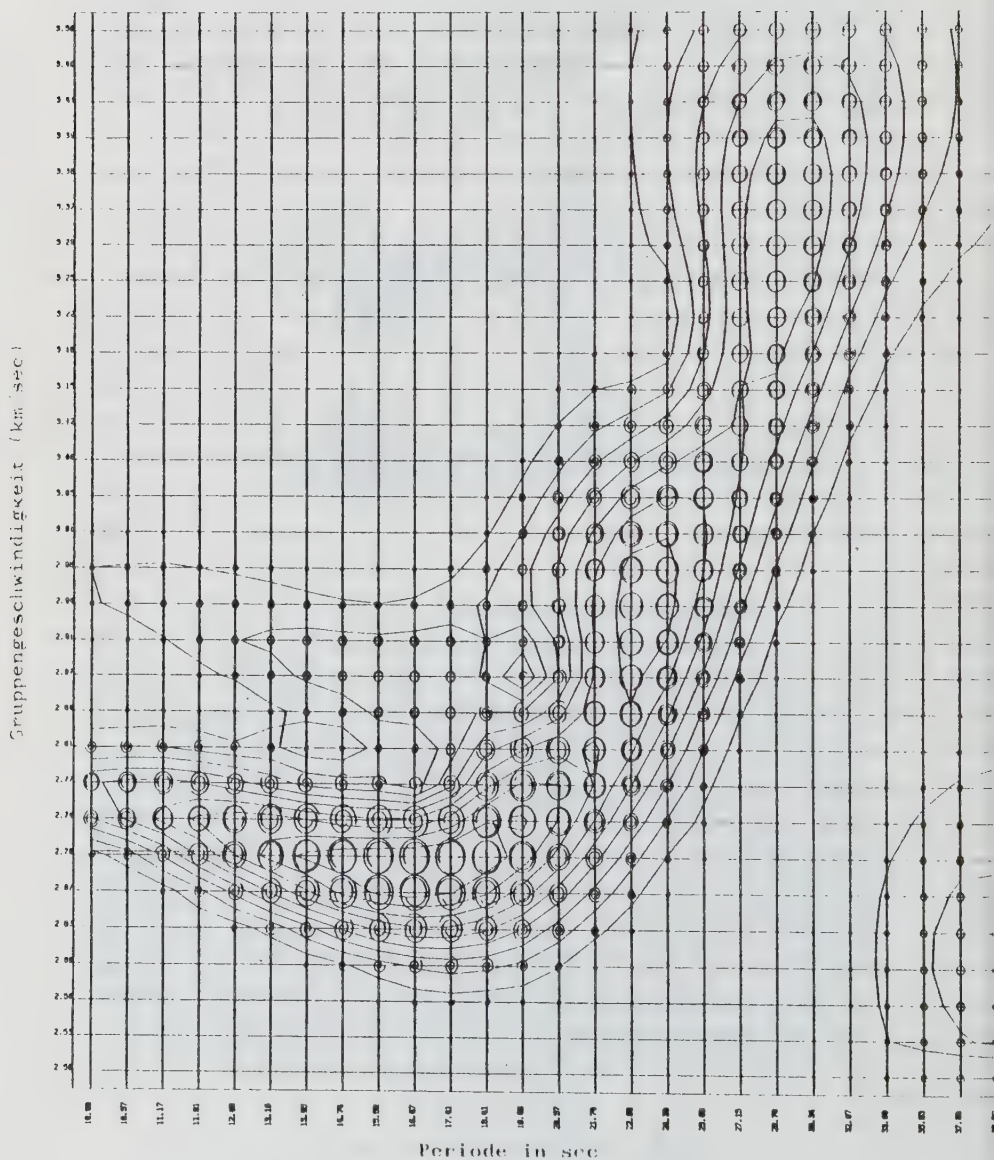


Abb. 25 Polarisations-Dispersions-Matrix der theoretischen Z und R-Komponenten des Modells "JM" mit "Multipathing".
Orientierung der Hodographen :



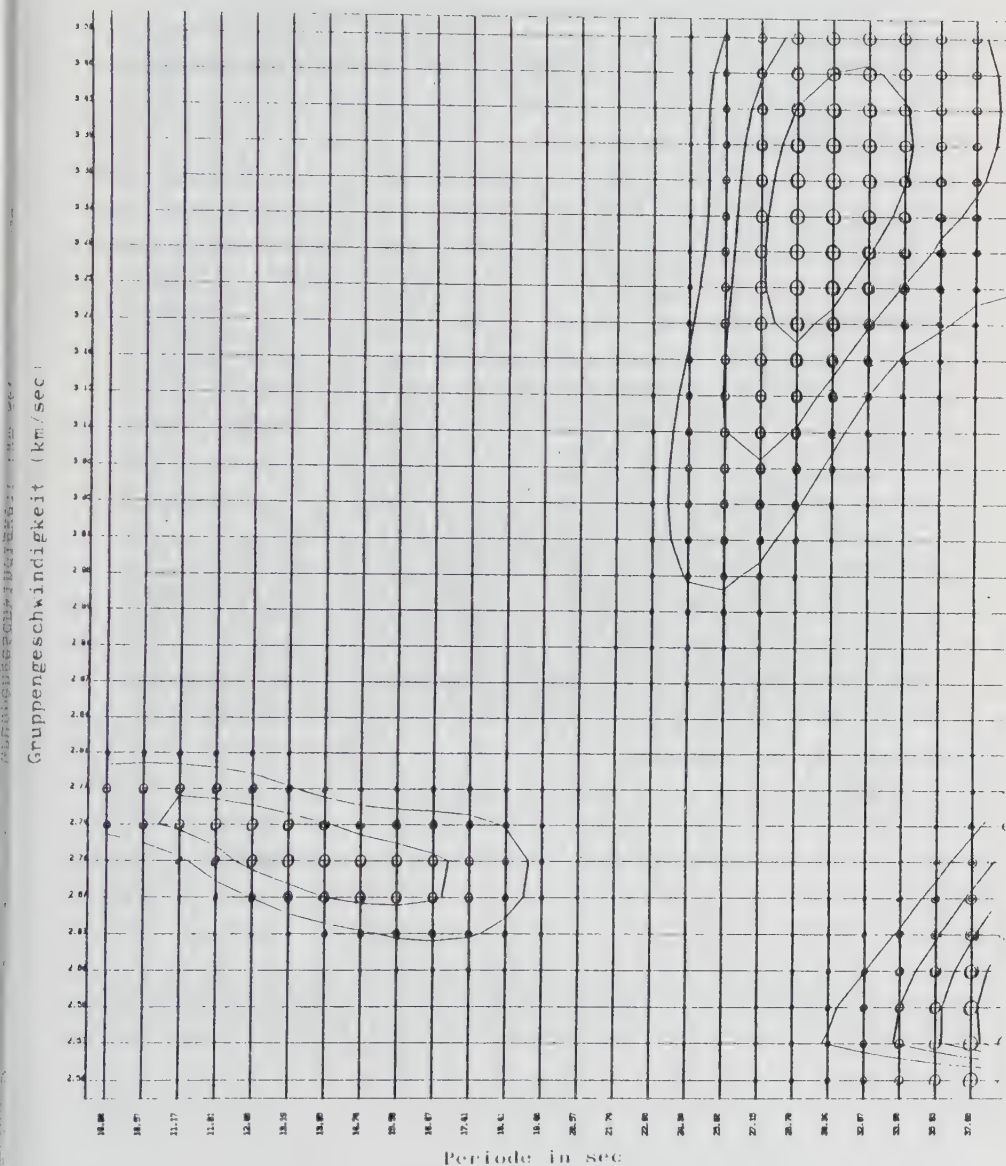


Abb. 26 Polarisations-Dispersions-Matrix der theoretischen Z- und R-Komponenten des Modells "JM" bei veränderter Herdorientierung. Orientierung der Hodographen :



Geschwindigkeit sind wiederum auf Aliasing-Effekte bei der Berechnung der theoretischen Seismogramme zurückzuführen. Ebenso scheint die Schräglage der Schwingungsellipsen bei ca. 12 sec durch die durch Aliasing entstandene Überlagerung des invers dispergierten Teils der Rayleigh-Grundmode mit einer höheren Mode entstanden zu sein.

Als letzter rechnerischer Schritt der Datenaufbereitung wurden im Versuch- und-Irrtum- Verfahren Modelle gesucht, die hinreichend genau die gemessene Gruppengeschwindigkeits-Dispersion aufweisen. Obgleich die Inversion nicht eindeutig ist, sollte die "Morphologie" der Elliptizität, die für die Modelle berechnet wurde, ähnlich der der gemessenen sein. Alle in dieser Arbeit berechneten Modelle erheben keinen Anspruch, eine real zu beobachtende Schichtfolge wiederzugeben. Die Gründe dafür sind :

- Die Gruppengeschwindigkeits-Dispersion ist ein integrales Ergebnis des gesamten Wellenwegs. Nachdem die verwendete Modellrechnung nur ebene Schichten zuläßt, kann somit nur ein "mittleres Modell" berechnet werden, was insbesondere bei gemischten Wegen über Teile ozeanischer und kontinentaler Kruste nicht sehr sinnvoll ist.

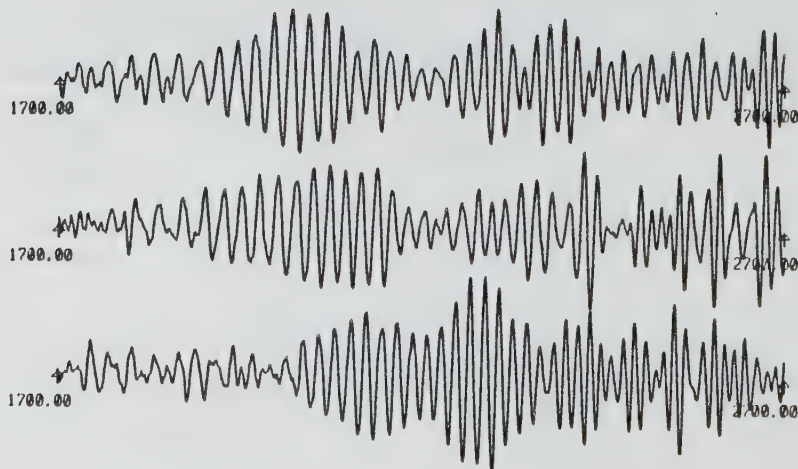
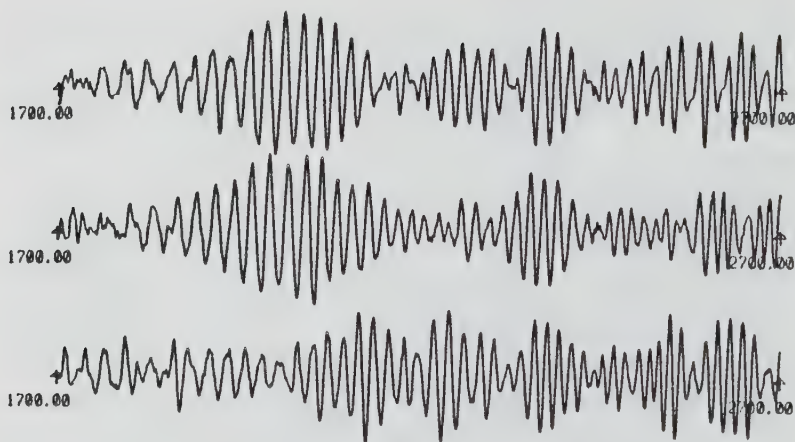
- Bei dem einfachen Versuch-und-Irrtum-Verfahren bleibt weitgehend unberücksichtigt, daß die zu invertierenden Daten Meßfehler aufweisen und aufgrund der Unschärferelation ein nur endliches Auflösungsvermögen haben. Eine gründlich durchgeführte Inversion erfordert auch, daß die Signifikanz eines Modellparameters für das Ergebnis angegeben wird.

- In dieser Arbeit wurden z.T. Herdzeiten und Epizentren dem GRF-Bulletin entnommen, das gegenüber den PDE-Reports, die auf ein globales Stationsnetz zurückgreifen können, Fehler aufweist.

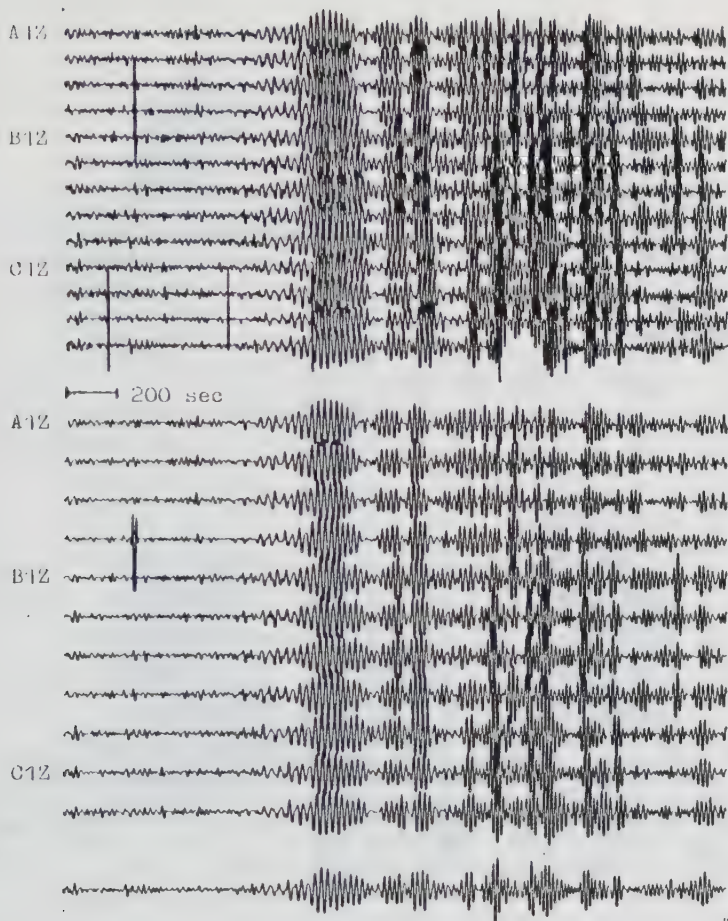
Ziel der vorliegenden Arbeit ist es jedoch nicht, neue Krusten- Mantel- Modelle aufzustellen oder alte zu bestätigen.

Ratten - Inseln

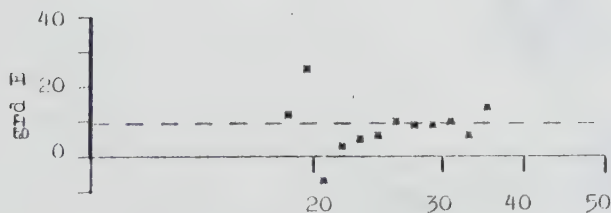
Die 3-K-Registrierungen dieses Bebens zeigen einen scheinbar monofrequenten Wellenzug, der jedoch deutlich dispergiert ist, wenn man den Frequenzgehalt am Intervallanfang und -ende vergleicht. Eine ausgeprägte Airy-Phase ist in keiner der Registrierungen zu erkennen, wohl aber zahlreiche Amplitudenminima. In den PDMs der H-Komponenten zeigt sich bereits in der Wellengruppe vor dem ersten Amplitudenminimum das für eine Überlagerung von Wellen typische Öffnen und Schließen der Schwingungsellipsen. Während bei der A1-Station die Richtung der linearen Polarisation mit dem geographischen Azimut etwa übereinstimmt, so weist die Polarisation an der B1-Station in weiter westliche Richtung. Die Polarisation der Coda (?), deren Periodenlänge weiterhin mit der Zeit abzunehmen scheint, ist ebenfalls zwischen den Stationen uneinheitlich. In der Montage der Z-Komponenten erweisen sich die ersten drei Wellengruppen als über das gesamte Array kohärent, in der nachfolgenden Coda fällt das unterschiedliche Aussehen der Registrierungen des A-Subarrays zu denen des restlichen Arrays auf. Die Azimute der wkA der ersten Wellengruppe streuen bei Perioden > 24.3 sec recht gering um das geographische. Die wkA der beiden folgenden Wellengruppen zeigt bei Perioden < 16 sec starkes "Multipathing". Das Ergebnis der wkA der Coda in aufeinander folgenden 200 sec Intervallen ist neben verbreitetem "Multipathing" ein Wellenanteil, der deutlich weiter aus Osten kommt, als nach dem geographischen Azimut zu erwarten. Die PDA der R- und Z-Komponenten erbringt insbesondere bei der B1-Station stark geneigte Ellipsenachsen. Wie auch bei anderen Beobachtungen mit ausgeprägter Wellenausbreitung über mehrfache Wege, streuen die Halbachsen-Verhältnisse sowohl mit der Periode als auch zwischen den Stationen stark. Eine Inversion der Gruppengeschwindigkeits-Dispersion wurde nicht durchgeführt.



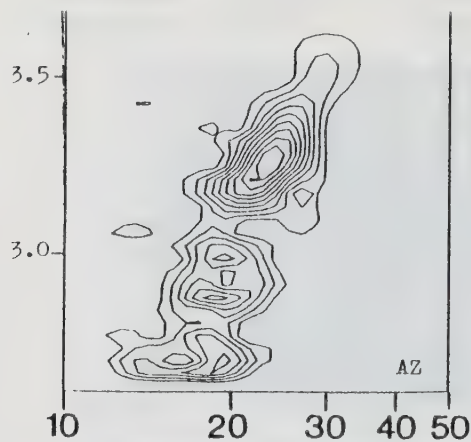
Vertikal-, NS-, EW- Komponenten
der Station A1, B1



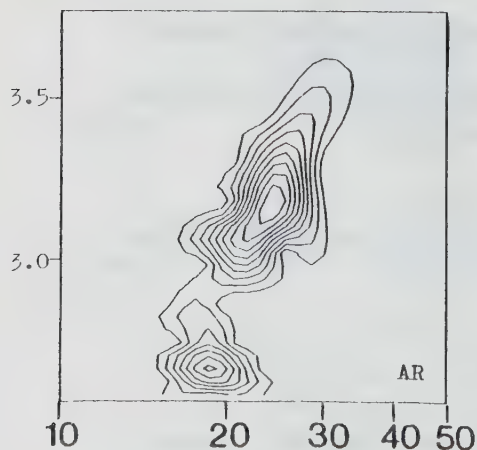
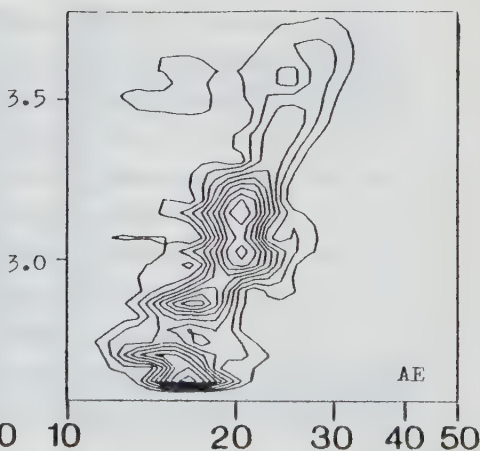
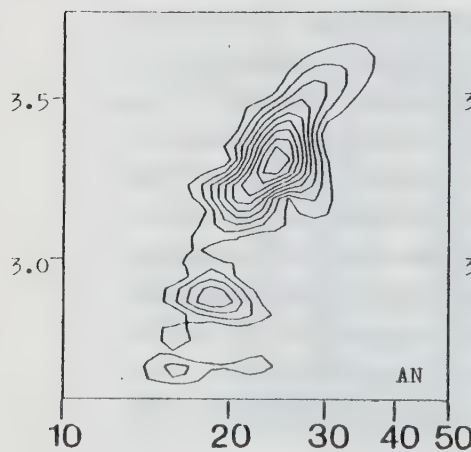
Vertikal-Komponenten der Stationen A1-C4,
10sec-TP-gefiltert (darunter)

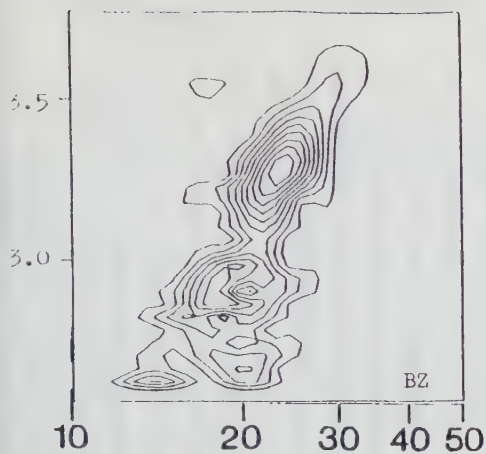


Ankunftsrichtung der RO-Mode in
Abhängigkeit von der Periode
gemäß der ω -k-Analyse

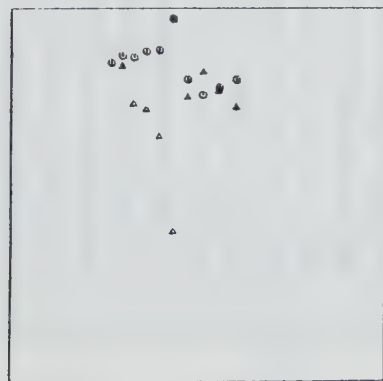
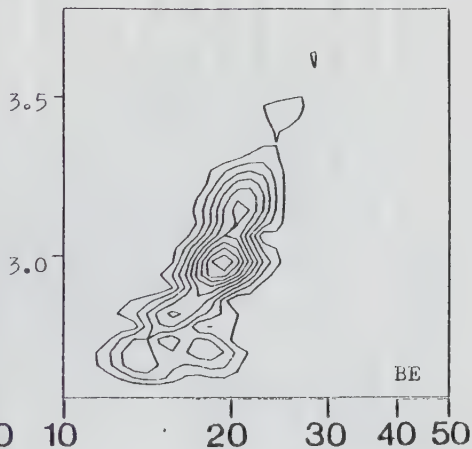
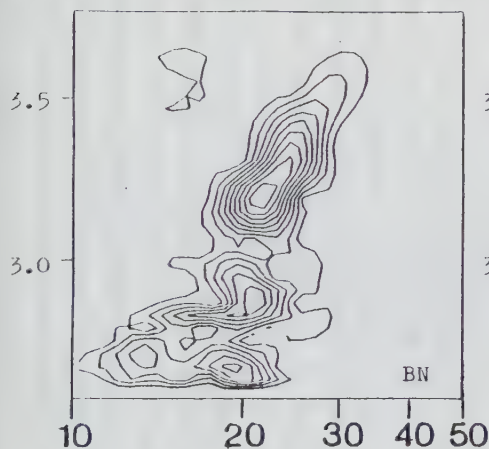


Gabor - Matritzen
der Station A1
horizontal : Periode (sec)
vertikal : Gruppengesch.
(km/sec)

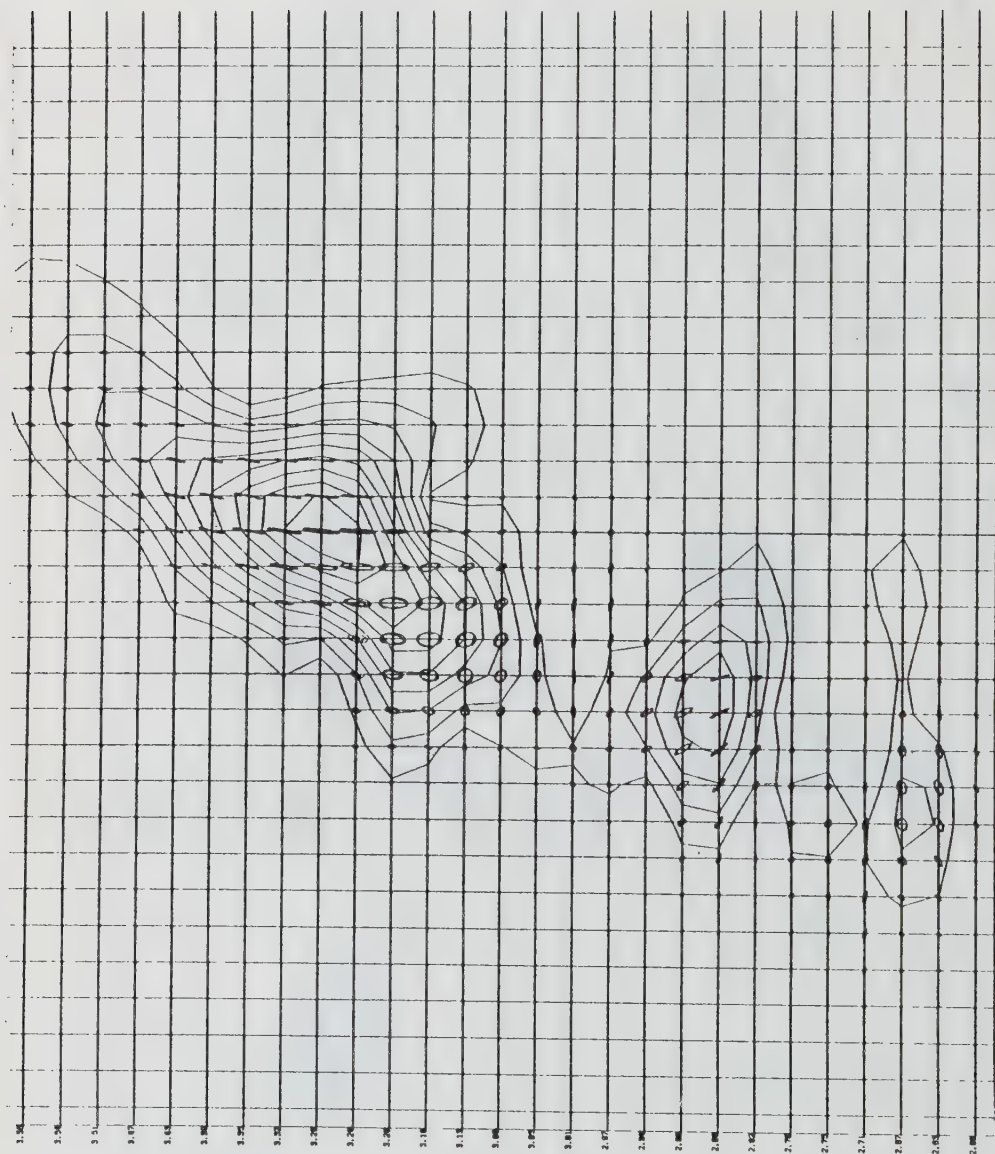




Gabor - Matrizen
der Station B1
horizontal : Periode (sec)
vertikal : Gruppengesch.
(km/sec)



Elliptizitäten in Abhängig-
keit von der Periode
 $\odot \hat{=}$ A1, $\triangle \hat{=}$ B1



Polarisations-Dispersions-Matrix der Horizontal-Komponenten
der Station A1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)

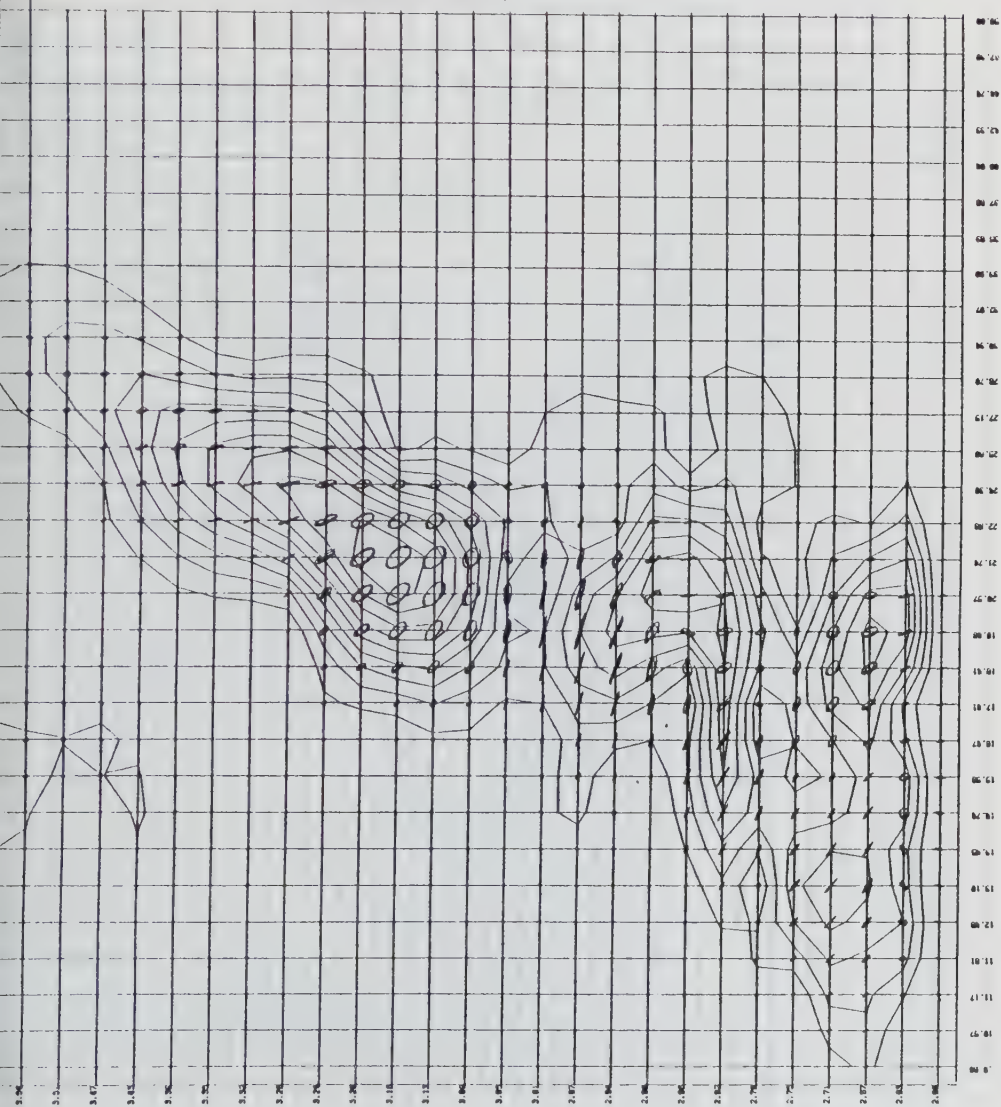
Polarisations-Dispersions-Matrix der Horizontal-Komponenten
der Station B1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)



Rat Islands

30.1.81

8:52:44.1

51.74 N 176.27 E

Rat Islands

30.1.81

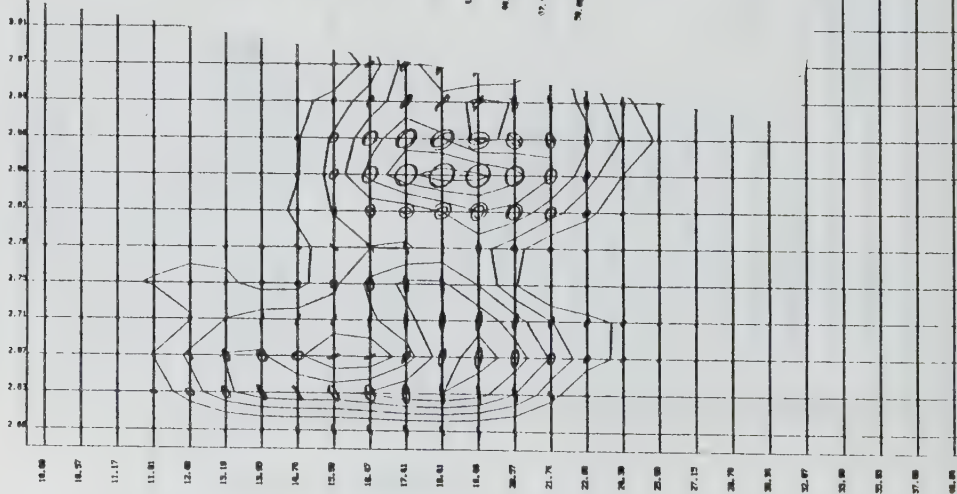
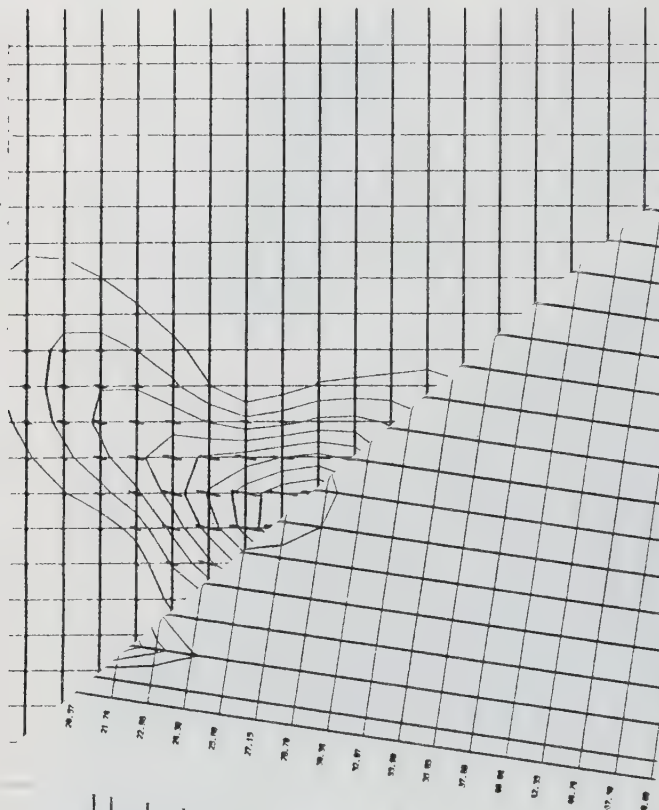
8:52:44.1

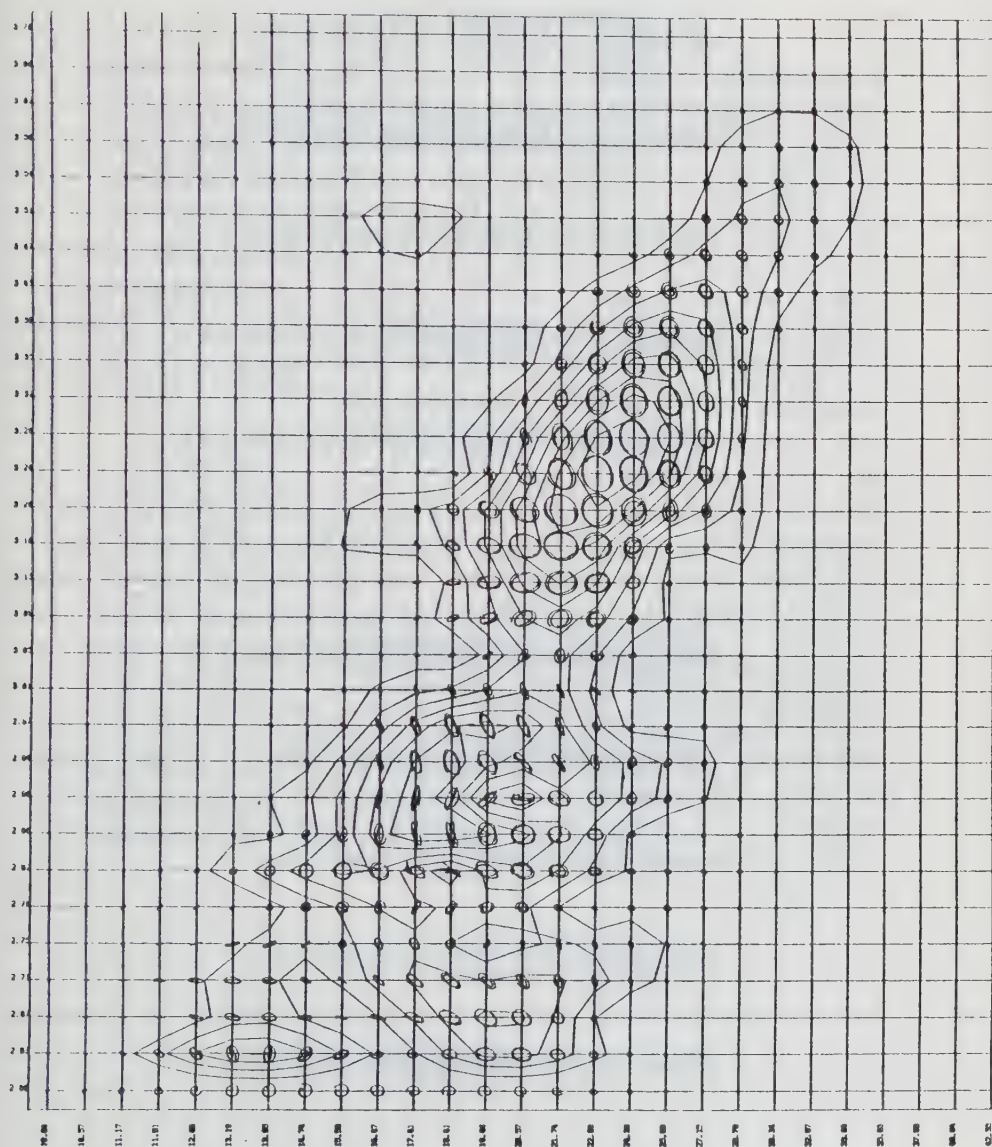
51.74 N 176.27 E

Polarisations-Dispersions-Matrix der Station B1

-ierung der Hodographen : der Horizontal-Komponenten

V_g (km/sec)
 se : Periode (sec)





Polarisations-Dispersions-Matrix der Z- und R-Komponente
der Station B1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: Periode (sec)

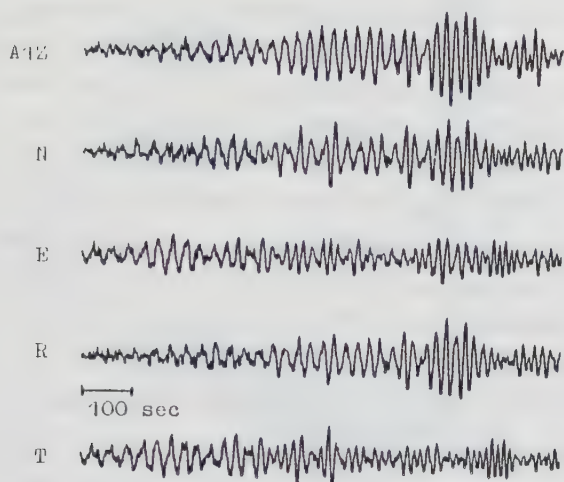
Vertikal-Achse : Gruppengesch. (km/sec)

Ochotskisches Meer

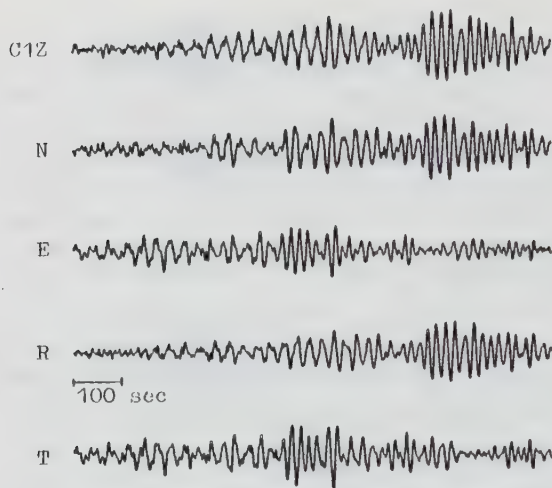
Die 3-K-Registrierungen des Behens zeigen in den Z-Komponenten untereinander starke Ähnlichkeit: ein langgezogener wohl-dispergierter Wellenzug endet nach einem Amplitudenminimum in einer Airy-Phase, der bei den einzelnen Stationen eine unterschiedliche Coda folgt. Zeigen die N-S-Komponenten untereinander noch eine gewisse Ähnlichkeit, so ist die der E-W-Komponenten doch recht gering. Die PDMS der H-Komponenten zeigen deutlich eine Überlagerung der L0- und R0-Mode, sowohl in der Lage der Airy-Phasen (L0 bei v_g ca. 2.9-3.0 km/sec, R0 bei v_g ca. 2.65-2.7 km/sec), als auch in der Polarisation, die im Bereich der niedrigsten Isolinie bei höheren Geschwindigkeiten Love- und bei niedrigeren Geschwindigkeiten Rayleigh-Charakter hat, wobei die Polarisation der Rayleigh-Welle mehr oder weniger stark von der der Love-Welle kontaminiert ist. Die in den Airy-Phasen ausgemessenen Polarisationsrichtungen sind

	A1	B1	C1
L0	45 grd W	54 grd W	57 grd W
R0	28 grd E	24 grd E	< 24 grd E

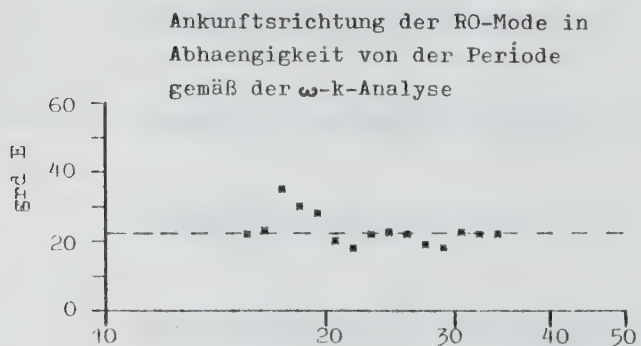
Die Montage der Z-Registrierungen zeigt einen selten kohärenten Wellenzug, bei dem sich lediglich die Coda zwischen den Stationen unterscheidet und das Amplitudenminimum der R0-Mode im A-Subarray anders als im restlichen Array aussieht. Die aus der wkA erhaltenen Azimute sind bei dem dispergierten Teil der Welle sehr konstant und stimmen sehr gut mit dem geographischen Azimut überein. Die Drehung der H-Komponenten ergibt eine ausgezeichnete Trennung von Love- und Rayleigh-Welle. Die Schwingungsellipsen in der Sagittalebene weisen bei den Stationen A1 und C1, abgesehen von dem Amplitudenminimum mäßig große Halbachsen-Neigung auf, im Gegensatz zur Station B1, bei der die Neigung erst bei längeren Perioden kleiner wird. Die Elliptizitätswerte der A1-Station zeigen einen glatten Verlauf, die der B1- und C1-Station streuen stärker. Mit gutem Willen erkennt man in den gemessenen Daten stark überhöht den Verlauf der theoretischen Elliptizität wieder.

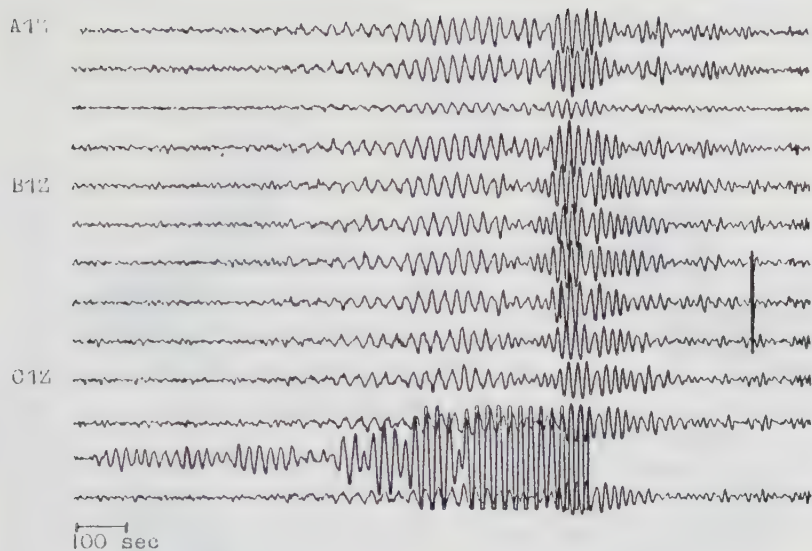


Vertikal-, NS-, EW-, Radial- und Transversal-Komponente
der Station A1, B1

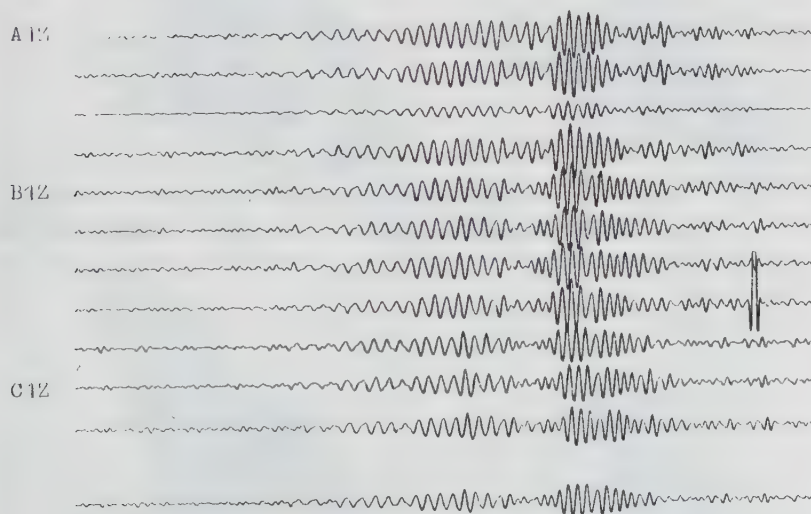


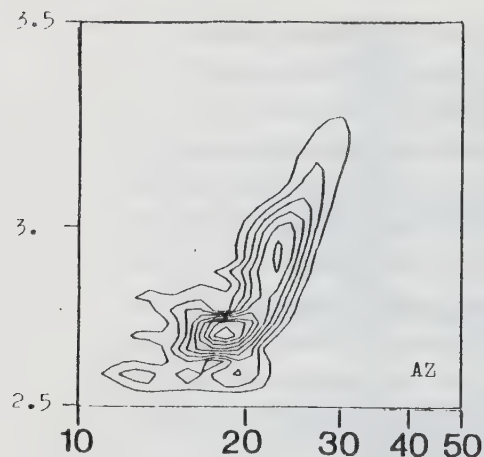
Vertikal-, NS-, EW-, Radial- und Transversal-Komponente
der Station C1



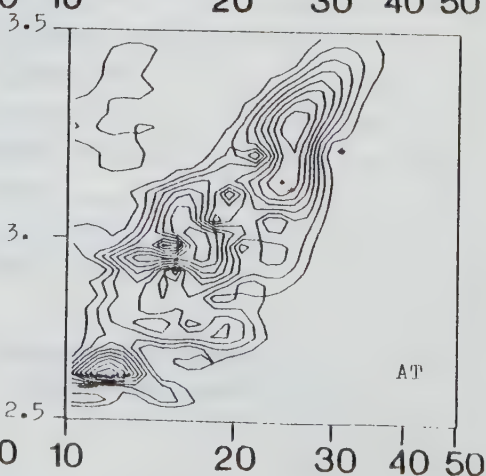
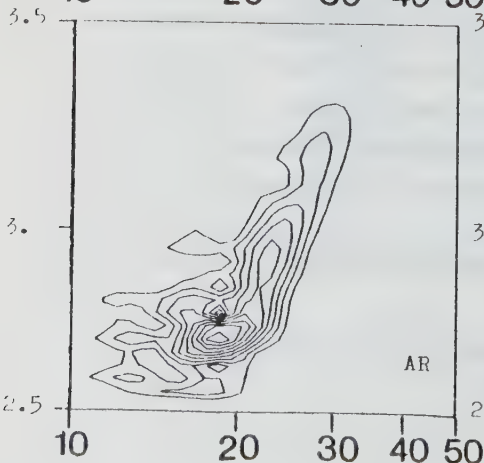
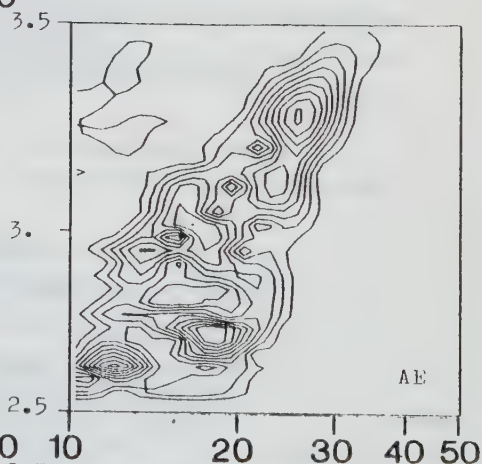
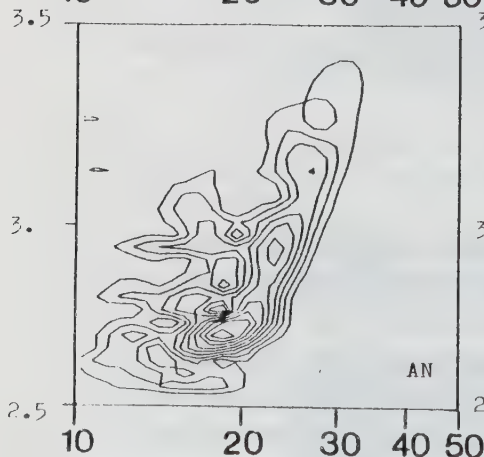


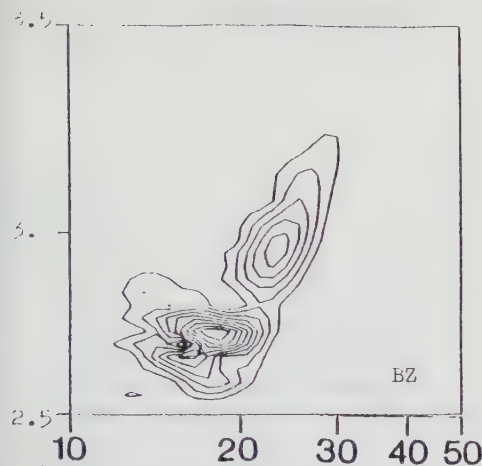
Vertikal-Komponenten der Stationen A1-C4

Vertikal-Komponenten der Stationen A1-C4
10sec-TP-gefiltert



Gabor - Matrizen
der Station A1
horizontal : Periode (sec)
vertikal : Gruppengesch.
(km/sec)





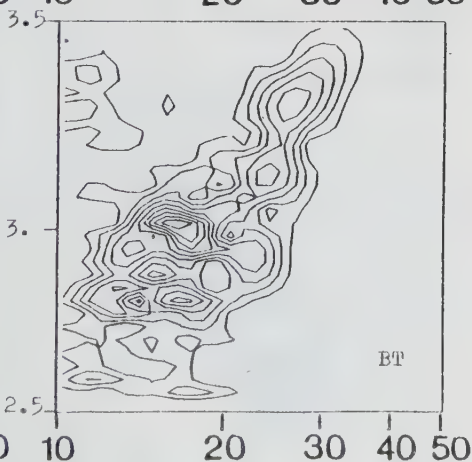
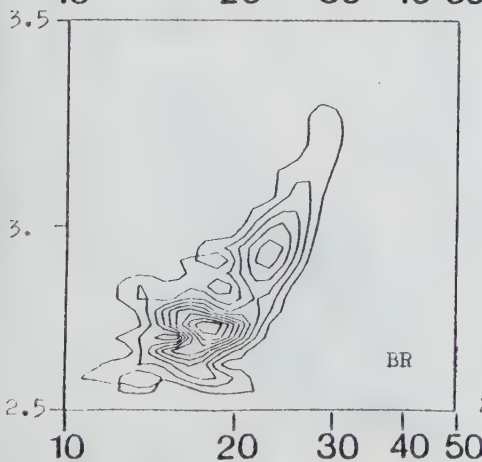
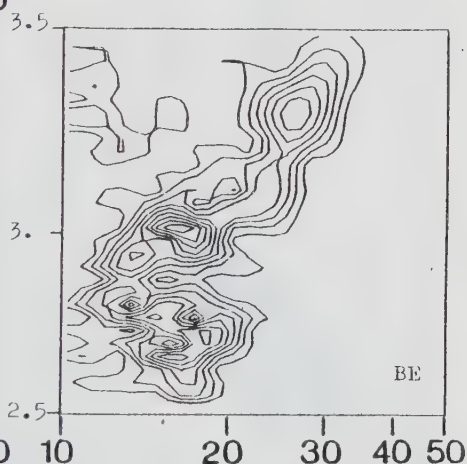
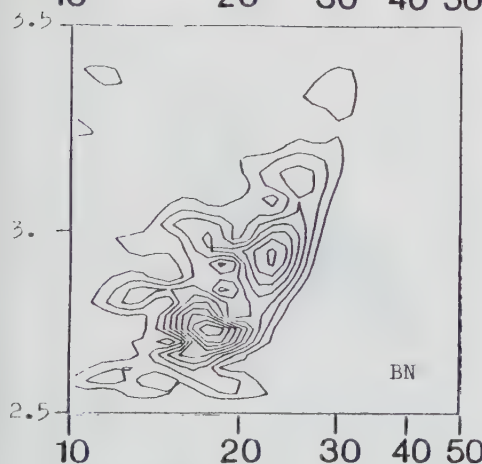
Gabor - Matritzen

der Station B1

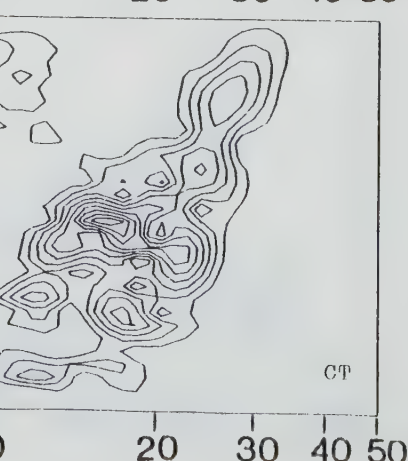
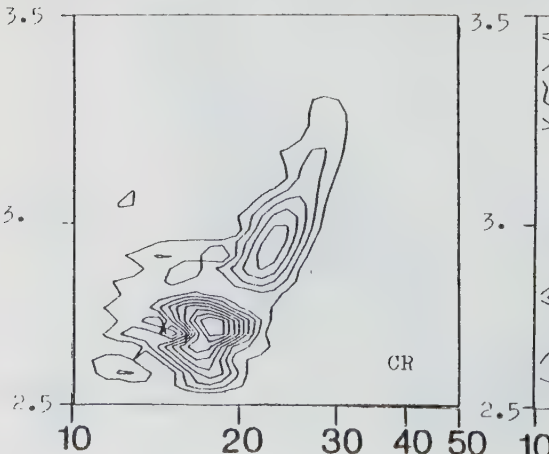
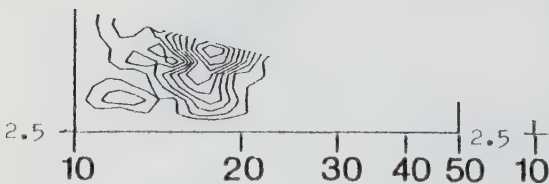
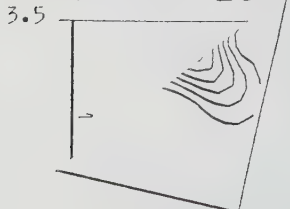
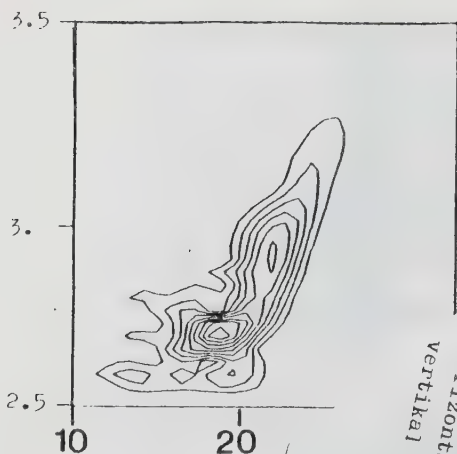
horizontal : Periode (sec)

vertikal : Gruppengesch.

(km/sec)



Gabor - Matriltzen
der Station B1
horizontal : Periode (sec)
vertikal : Gruppengesch.
(km/sec)



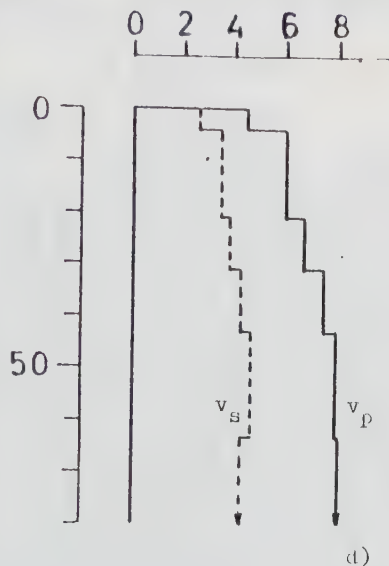
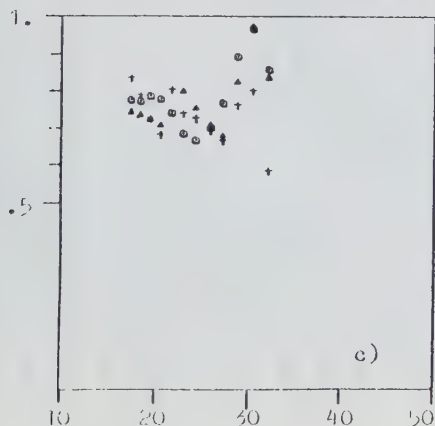
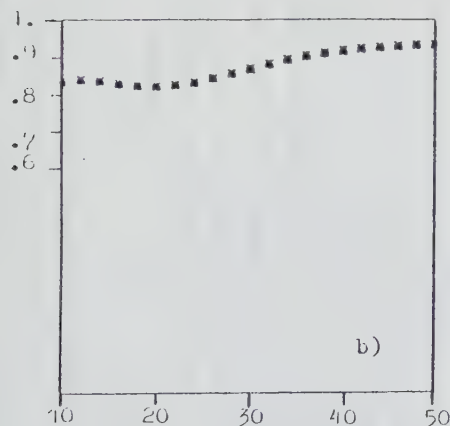
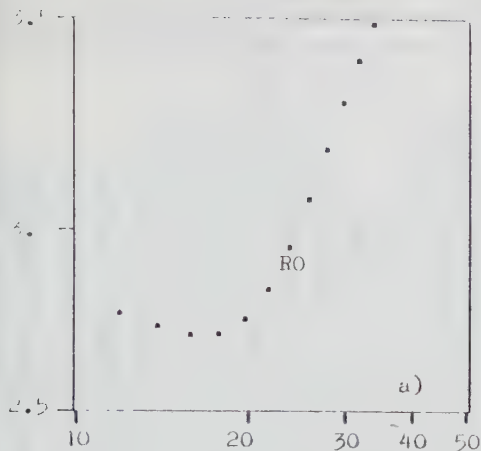


Abb. a) Theoretische Gruppengesch.-
Dispersion
horizontal : Periode (sec)
vertikal : v_s (km/sec)

Abb. b) und c)
Theoretische und gemessene
Elliptizitäten in Abhängig-
keit von der Periode

$\circ \hat{=} A1$, $\Delta \hat{=} B1$, $+\hat{=} C1$

Abb. d) den theoretischen Kurven
zugrundeliegendes Geschwin-
digkeits-Tiefen-Modell.
Falls nicht anders vermerkt,
gilt $v_s = 1/\sqrt{3} v_p$

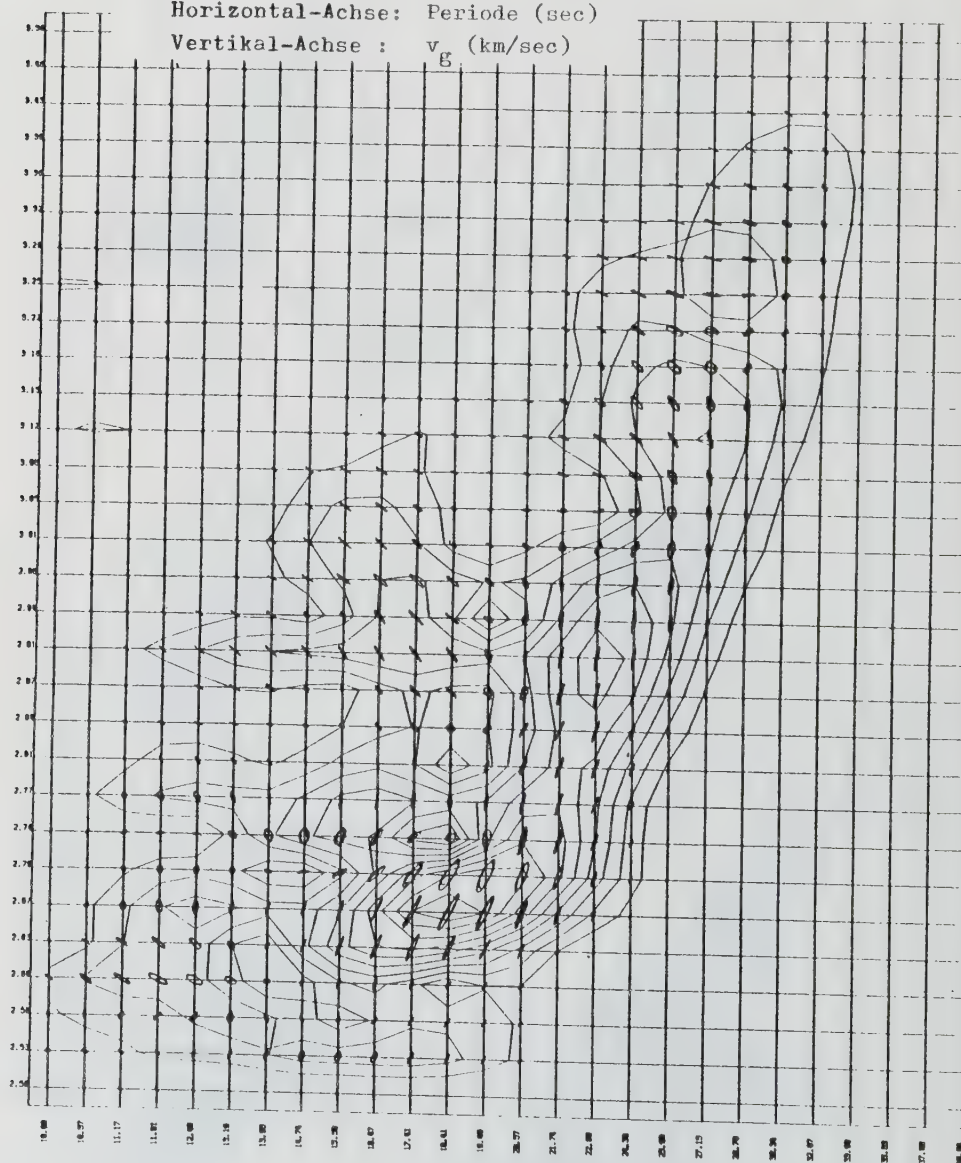
Polarisations-Dispersions-Matrix der Horizontal-Komponenten
der Station A1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: Periode (sec)

Vertikal-Achse : v_E (km/sec)



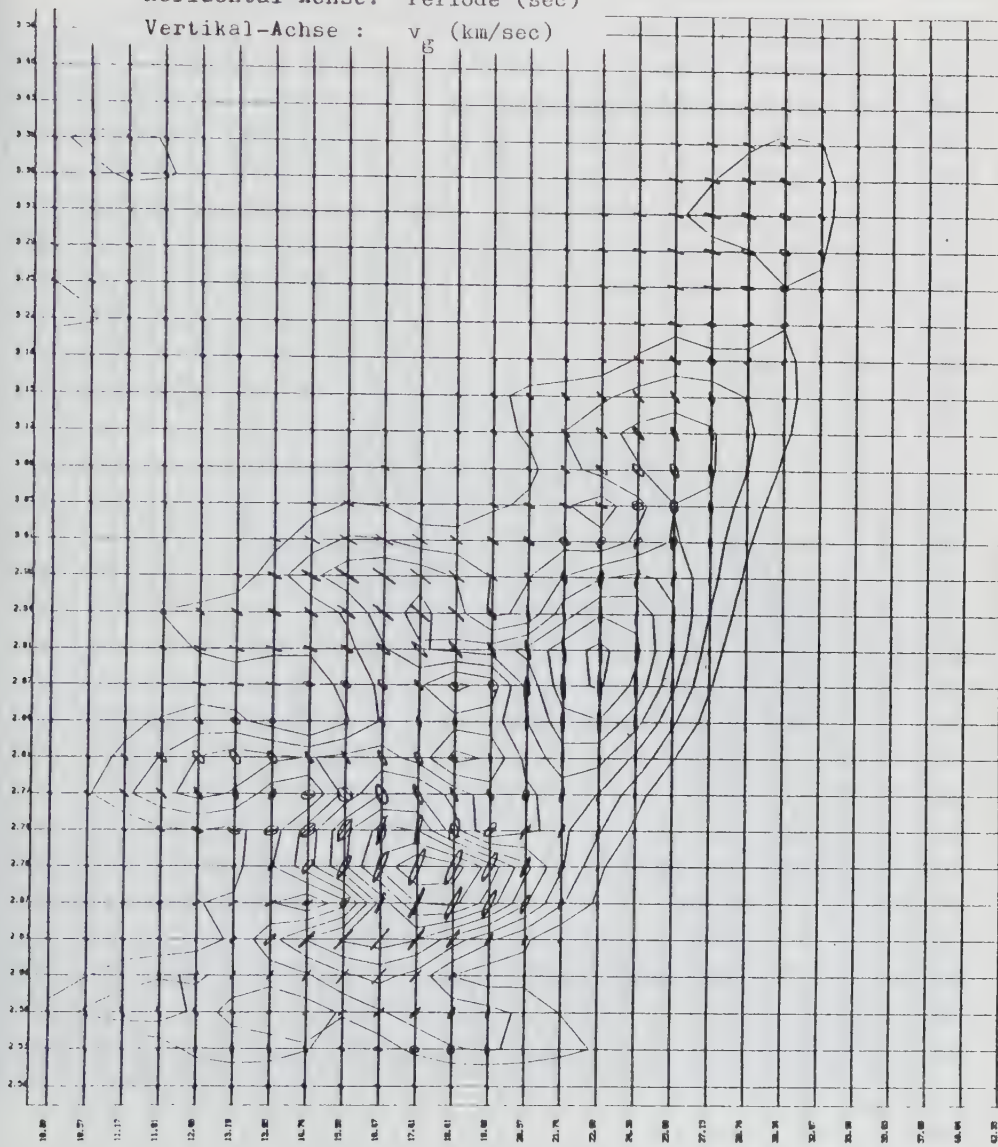
Polarisations-Dispersions-Matrix der Horizontal-Komponenten
der Station B1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: Periode (sec)

Vertikal-Achse: v_g (km/sec)



Ochotsk. Meer

23.8.81

12:00:26.5

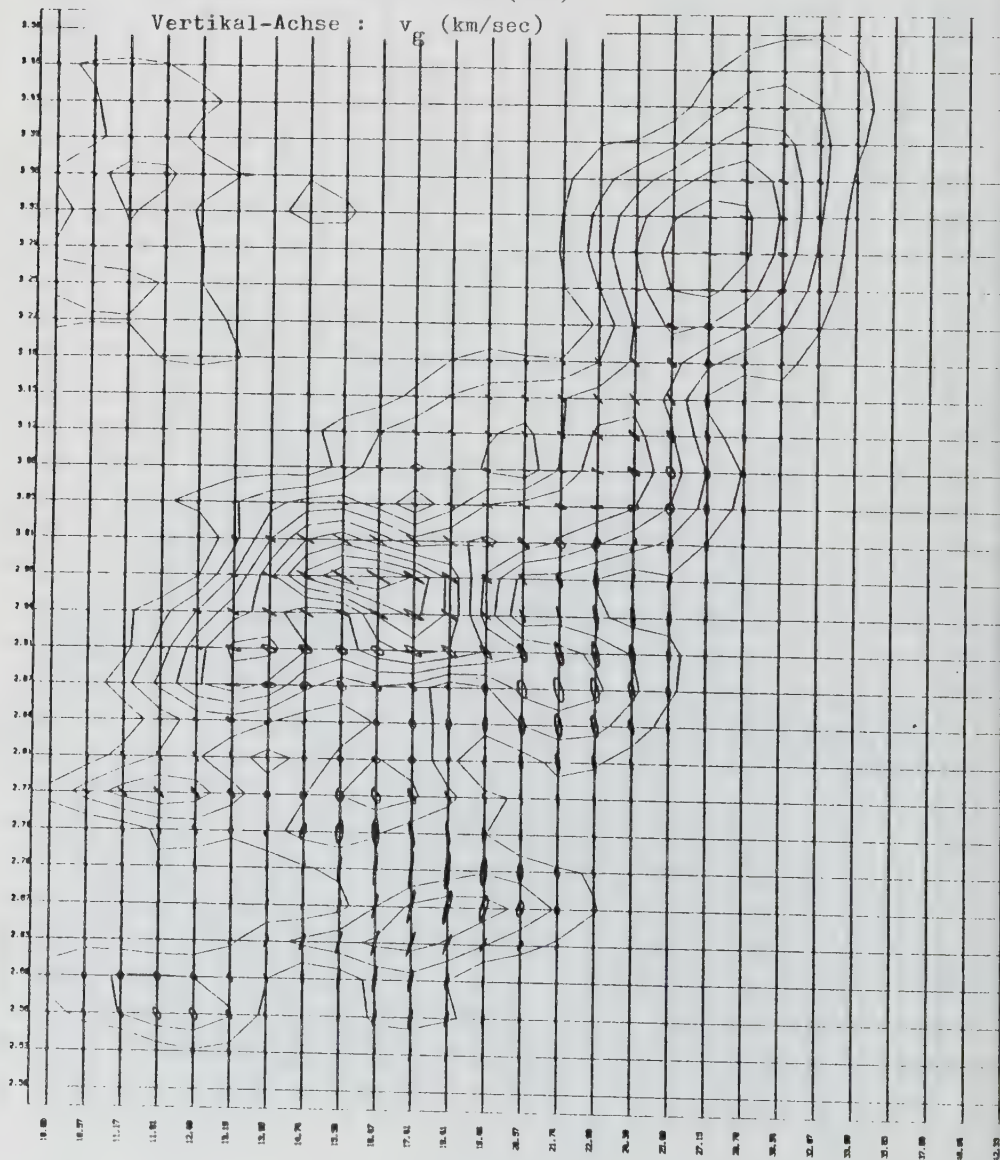
48.72 N 157.39 E

Polarisations-Dispersions-Matrix der Horizontal-Komponenten
der Station C1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: Periode (sec)

Vertikal-Achse : v_g (km/sec)

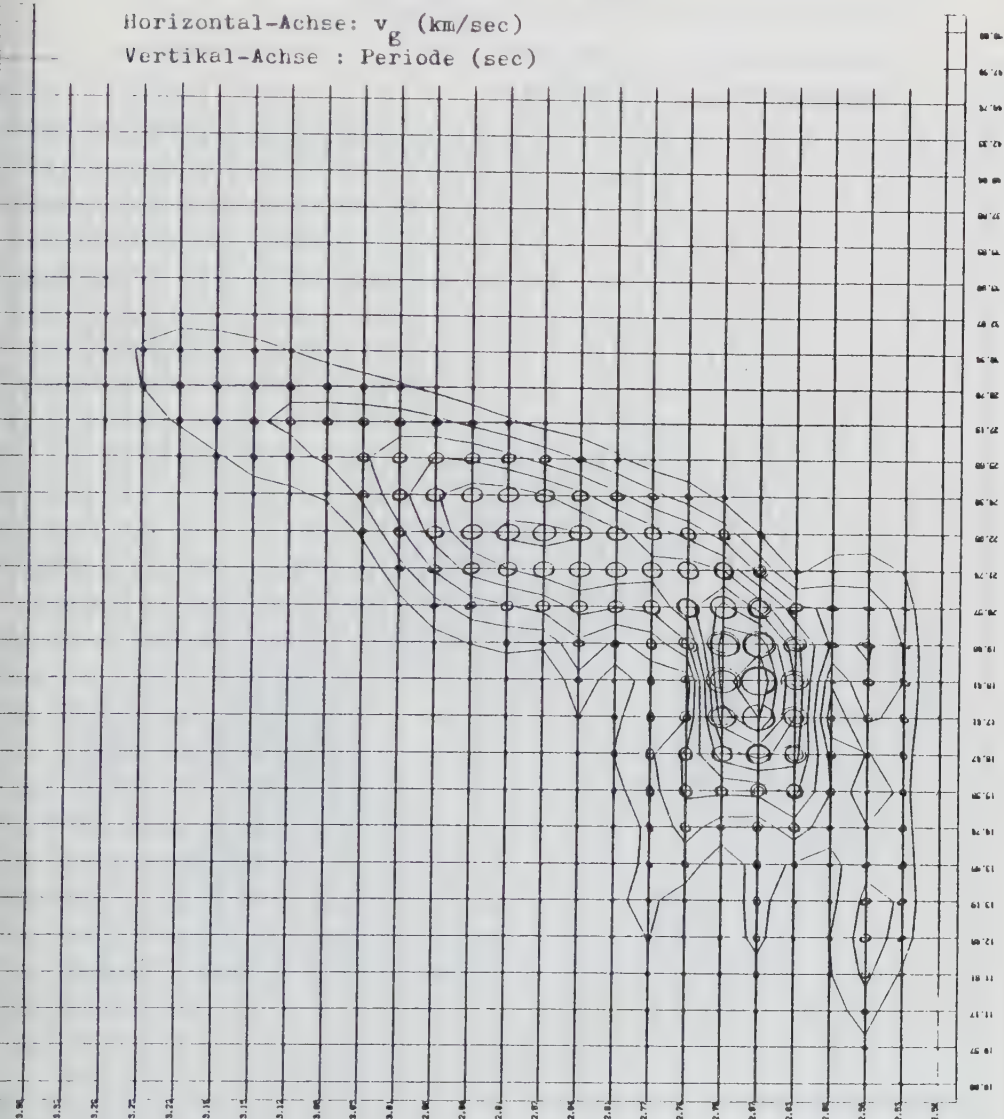
Polarisations-Dispersions-Matrix der Z- und R-Komponente
der Station A1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)



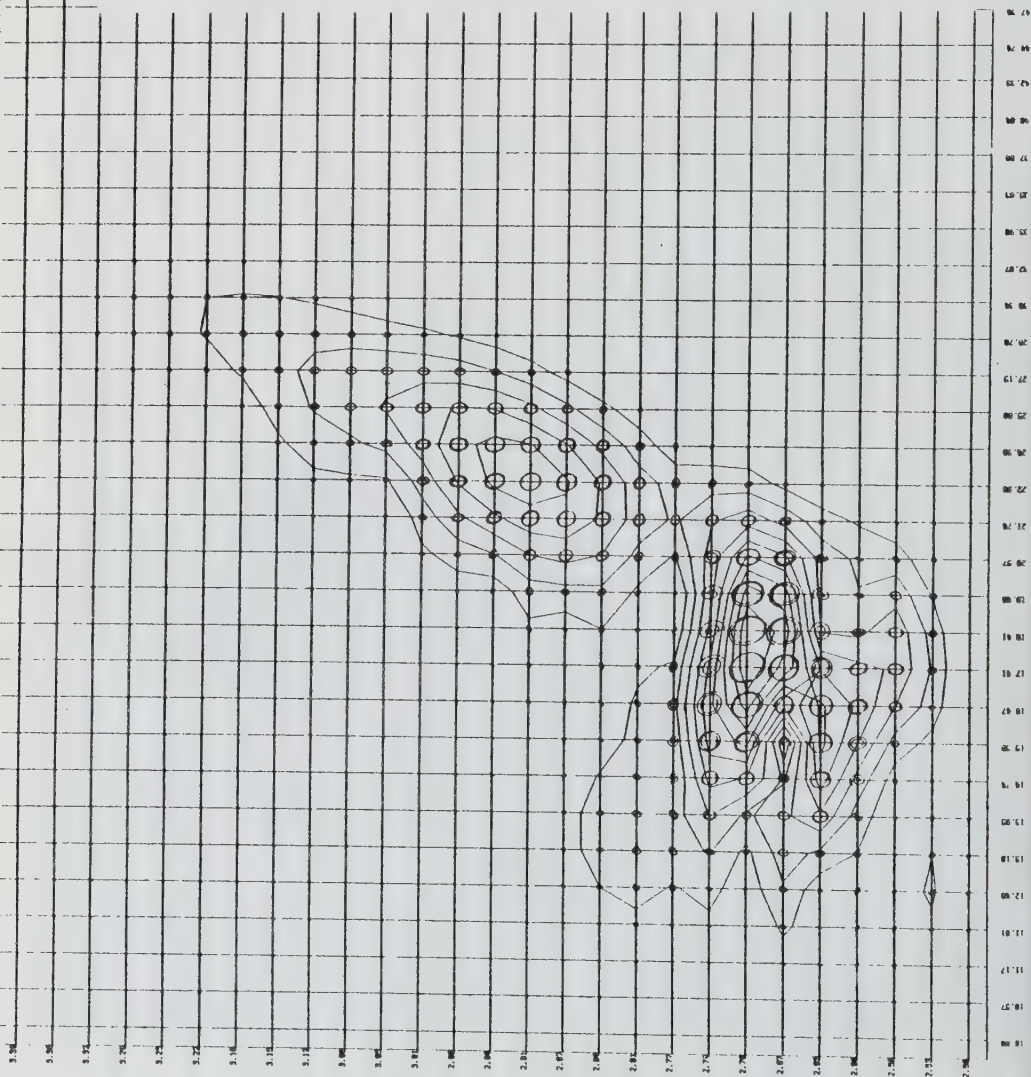
Polarisations-Dispersions-Matrix der Z- und R-Komponente
der Station B1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)



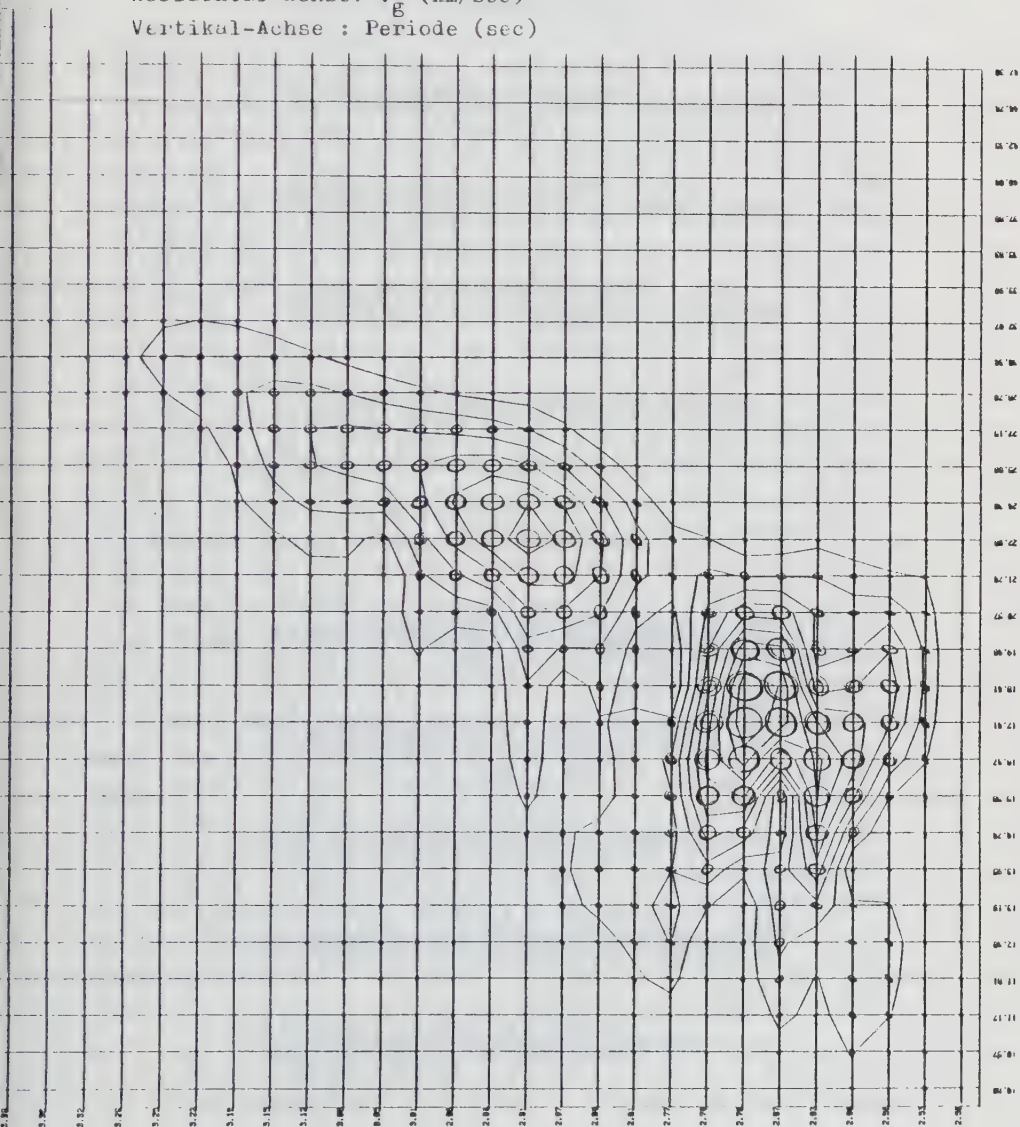
Polarisations-Dispersions-Matrix der Z- und R-Komponente
der Station C1

Orientierung der Hodographen :



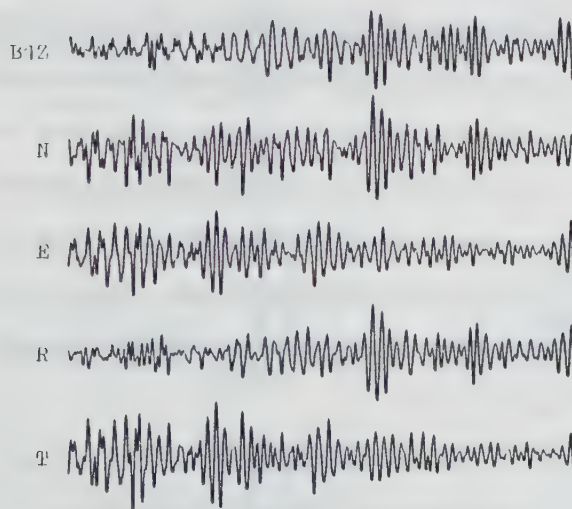
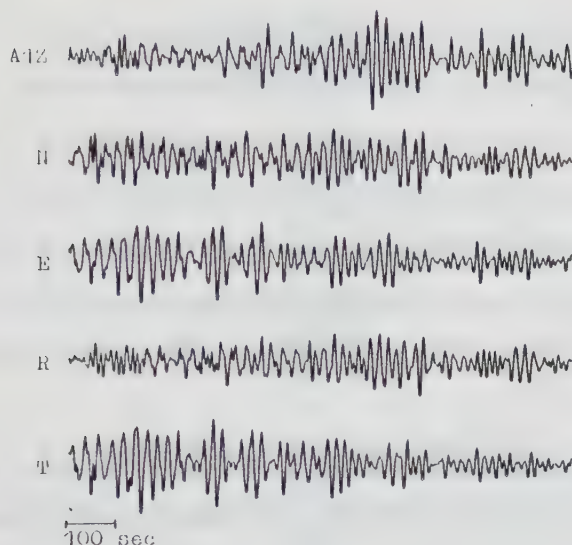
Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)

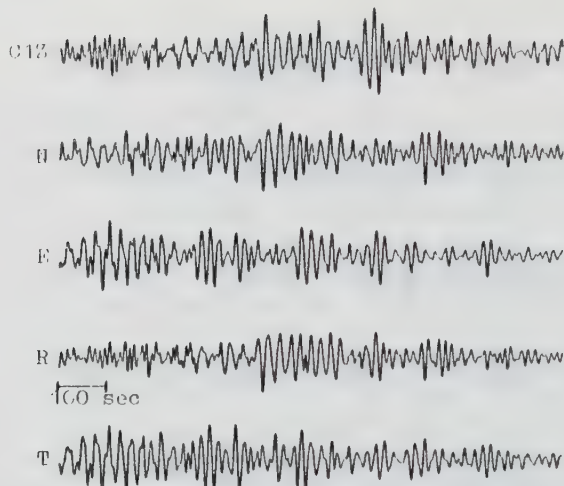


Kurilen

In den 3-K-Registrierungen des Bebens erkennt man in den Z-Komponenten zu Beginn des Zeitfensters hochfrequente Schwingungen, die später von langperiodischen immer stärker überlagert werden. Der Frequenzgehalt dieser Schwingungen ändert sich zwar deutlich mit der Zeit, doch schränkt die starke und unregelmäßige Amplitudenmodulation die Hoffnung auf einen unüberlagerten Wellenzug ein. In den H-Komponenten kann wegen relativ langer Perioden zu Beginn des Intervalls mit einer Love-Welle gerechnet werden. Dies bestätigen die PDMs, die im Geschwindigkeitsbereich von 3.-3.5 km/sec bei großen Amplituden eine recht einheitliche und oft völlig lineare Polarisierung mit einem Azimut von 60 grd E - praktisch senkrecht zum geographischen Azimut - zeigen. Außerhalb dieses Bereichs ändert sich die Polarisierung rasch und zeigt auch zwischen den Stationen keine Ähnlichkeit. Aus der Montage aller 10-sec-TP-gefilterten Z-Komponenten wird klar, daß der hochfrequente Wellenzug am Intervallanfang zu höheren Rayleigh-Moden gehört, da er im ganzen Array registriert wird und nach einer Airy-Phase (etwa bei der Zeitmarke 1950) nur noch undeutlich zu sehen ist. Bei der R0-Mode fällt auf, daß sich die Form der Enveloppen über das Array nur sehr schwach ändert, was bedeutet, daß die Array-Ausdehnung im Vergleich zu der des angenommenen Interferenzmusters klein ist. Die wKA weist stark streuende Azimute aus, die fast durchweg kleiner als das geographische sind. Auffallend stark verändert sich auch die Auflösung und die Wellenlänge. Die Analyse des inkohärenten Wellenteils zwischen den Zeitmarken 2680 und 2950 zeigt deutlich zwei Maxima, wobei der energiereichere Anteil aus einer Richtung von 80 grd E kommt. Nach der Filterung mit einem 12.5-sec-HP ist in der Montage die R0-Mode praktisch eliminiert. Die nahezu monofrequente Airy-Phase ist recht inkohärent, was vermutlich mehrere Ursachen hat. Zum einen zeigt die wKA deutlich eine Ausbreitung über mehrfache Wege; zum anderen setzt sich diese als "Lg" bezeichnete Phase aus den Airy-Phasen verschiedener höherer Moden mit etwa gleicher Gruppen-Laufzeit zusammen, wobei die Dominanz einzelner Moden sich räumlich verändert. Die Drehung in R- und T-Komponenten bewirkt eine gute Trennung der Lg-Phase im R-Anteil von der L0-Mode im T-Anteil. In den PDMs der R- und Z-Komponenten läßt sich der Verlauf des R0-Dispersionsastes erahnen, die Schwingungsellipsen zeigen bei Perioden < 25 sec zwischen den Stationen durchweg unterschiedliches Verhalten.

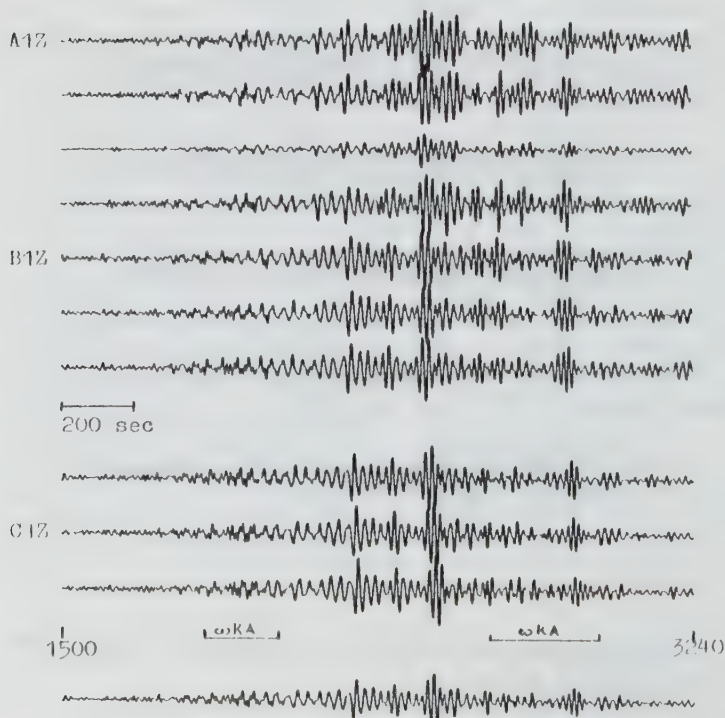


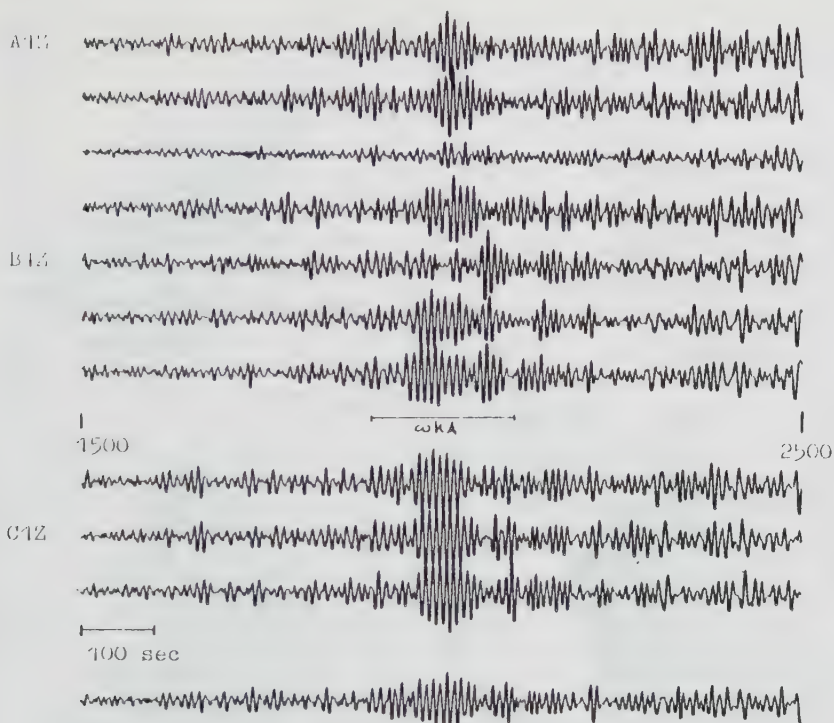
Vertikal-, NS-, EW-, Radial- und Transversal-Komponente
der Station A1, B1



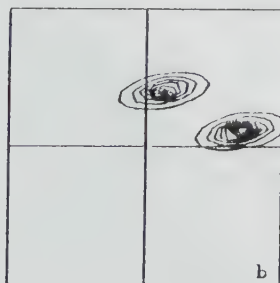
Vertikal-, NS-, EW-, Radial- und Transversal-Komponente
der Station C1

Vertikal-Komponenten der Stationen A1-C4

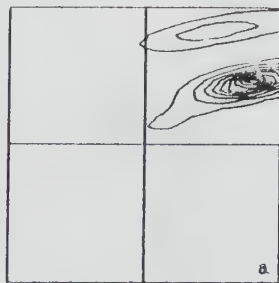




Vertikal-Komponenten der Stationen A1-C4
12.5sec-HP-gefiltert

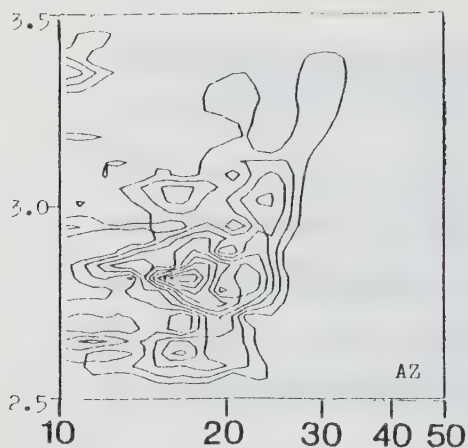


16.5 sec Periode
2680-2950

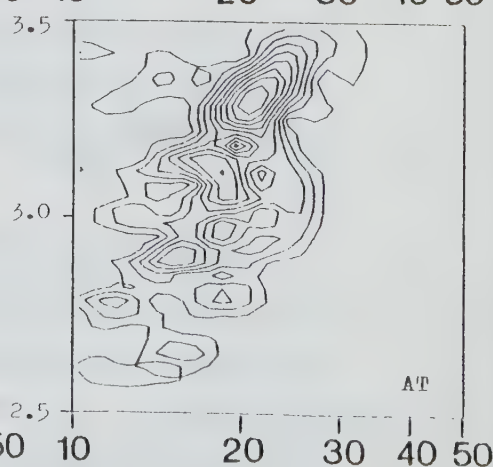
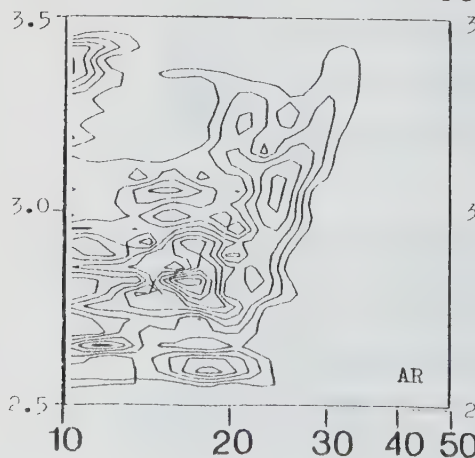
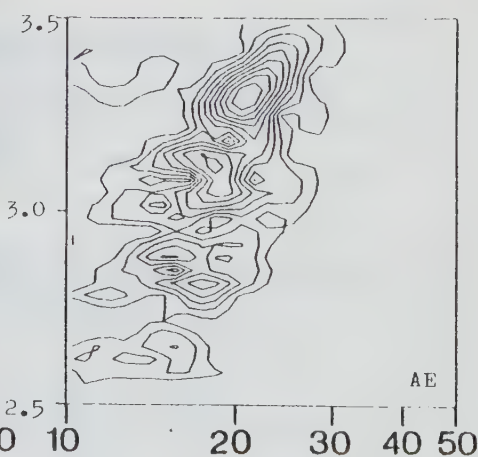
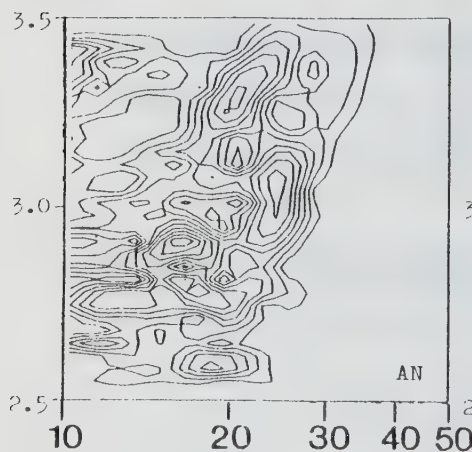


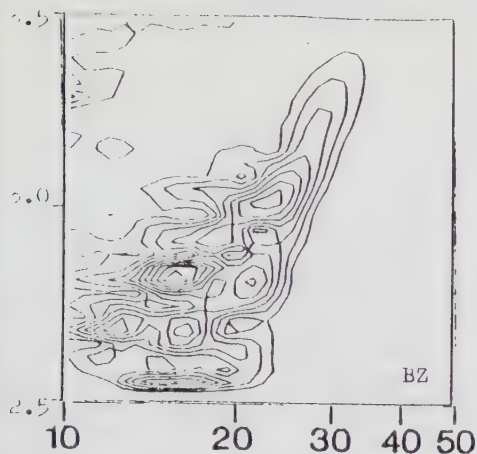
10. sec Periode
1900-2100

ωk -Analyse der vermeintlichen Airy-Phase einer
höheren Rayleigh-Mode und der Coda der RO-Mode (b)

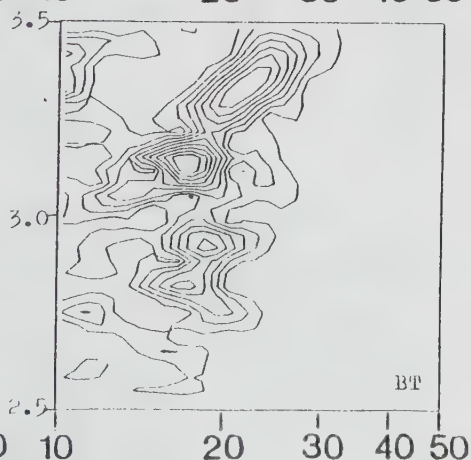
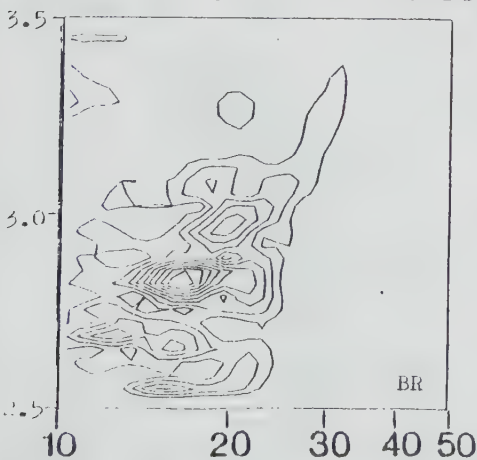
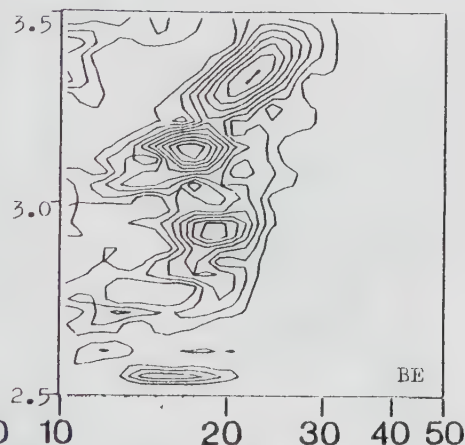
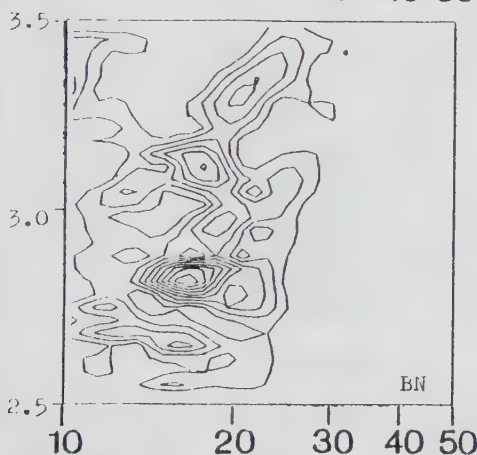


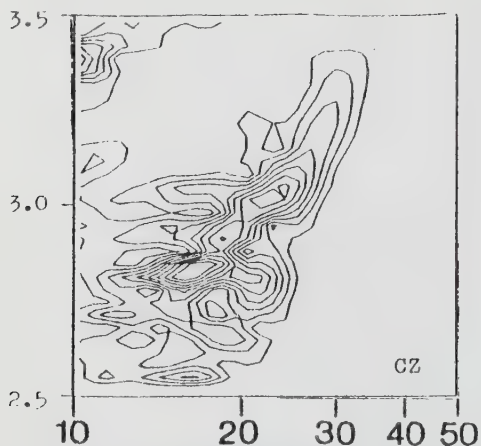
Gabor - Matrizen
der Station A1
horizontal : Periode (sec)
vertikal : Gruppengesch.
(km/sec)



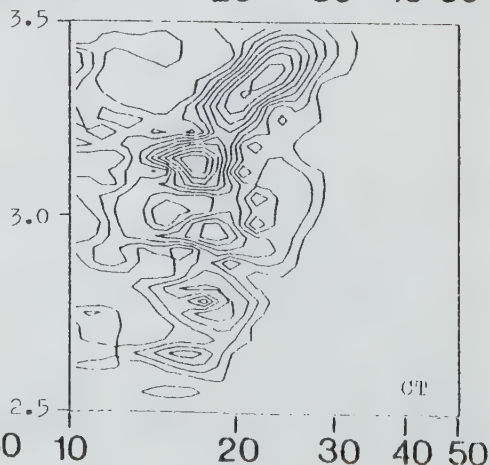
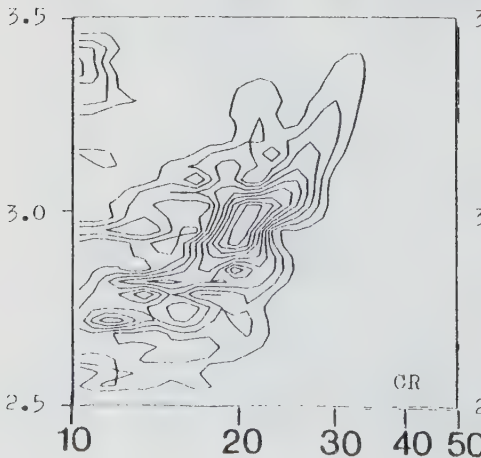
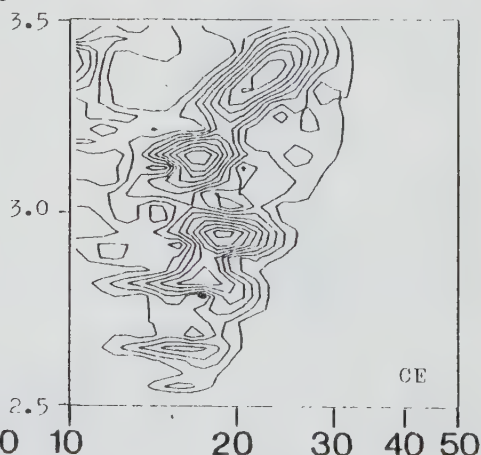
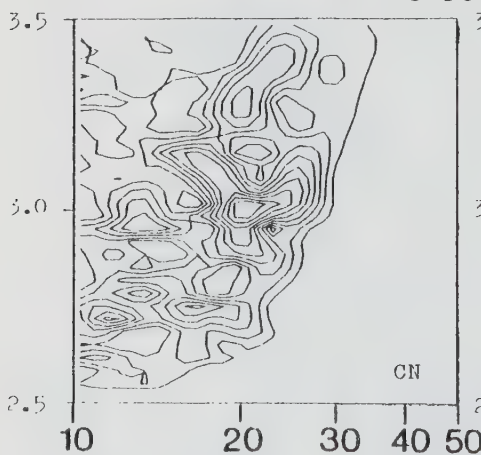


Gabor - Matritzen
der Station B1
horizontal : Periode (sec)
vertikal : Gruppengesch.
(km/sec)





Gabor -Matritzen
der Station C1
horizontal : Periode (sec)
vertikal : Gruppengesch.
(km/sec)



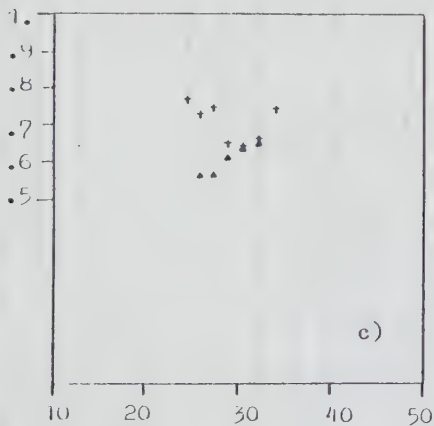
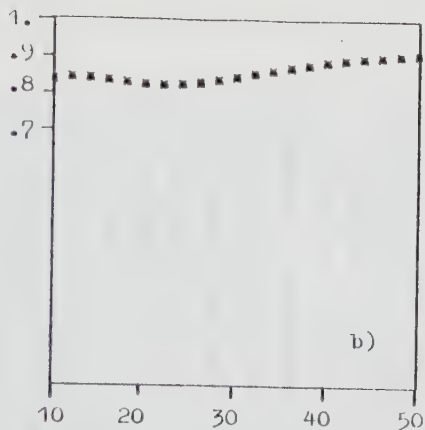
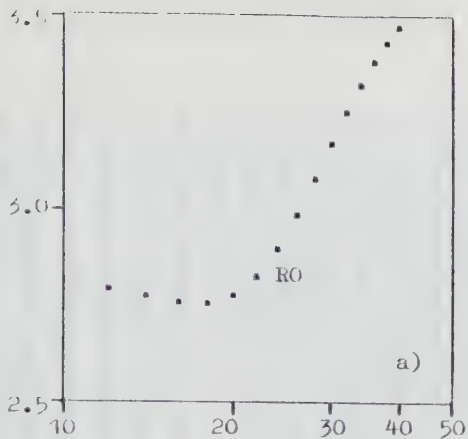
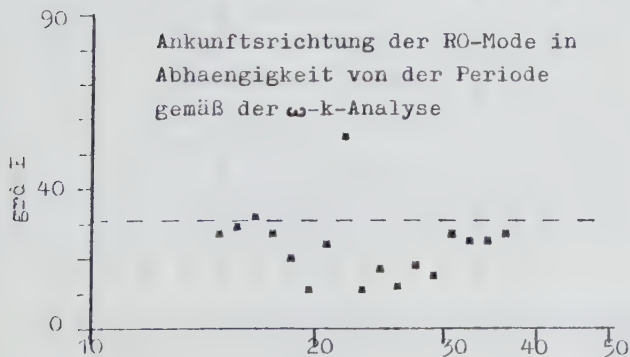
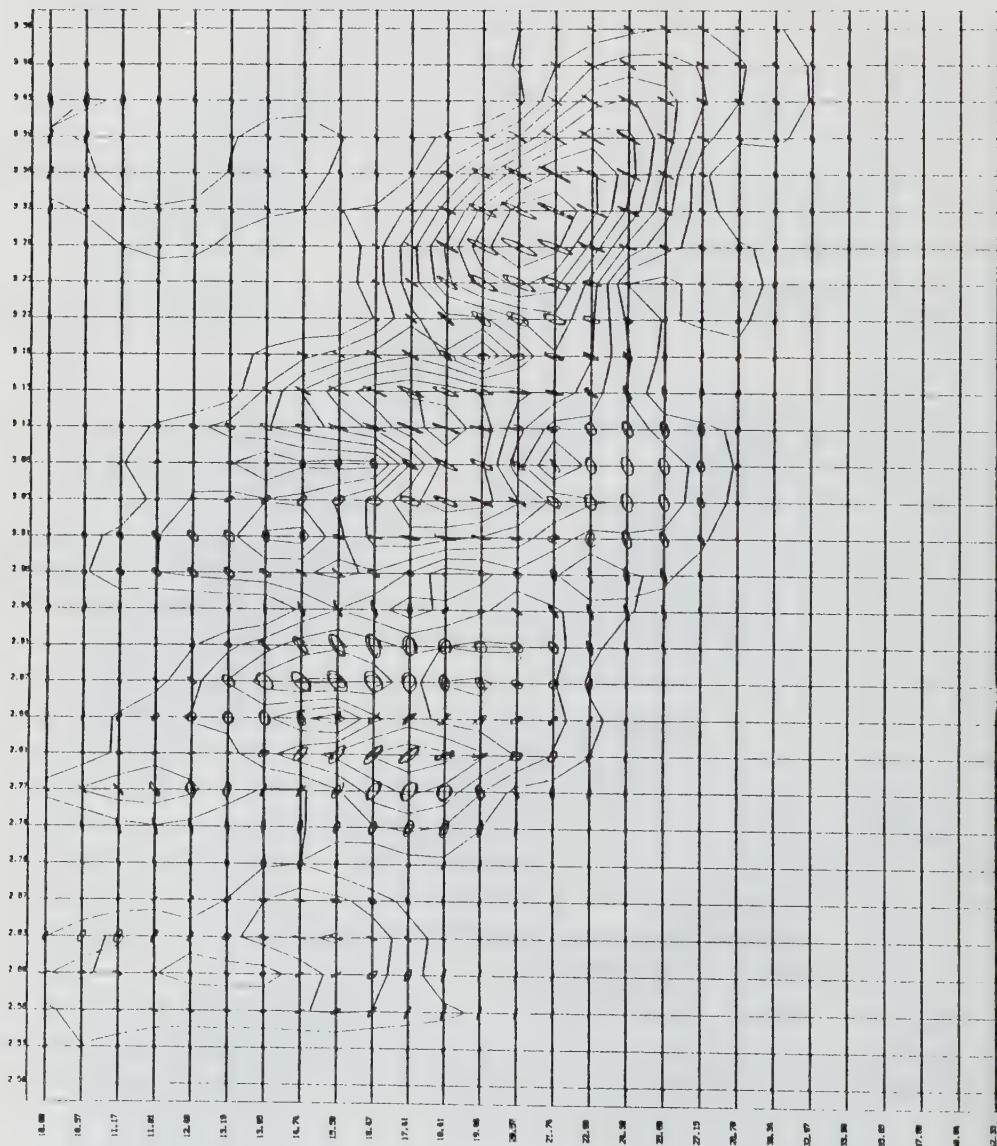


Abb. a) Theoretische Gruppengesch.-
Dispersion
horizontal : Periode (sec)
vertikal : v_g (km/sec)

Abb. b) und c)
Theoretische und gemessene
Elliptizitäten in Abhängig-
keit von der Periode
 $\Delta \hat{=} B1$, $+ \hat{=} C1$





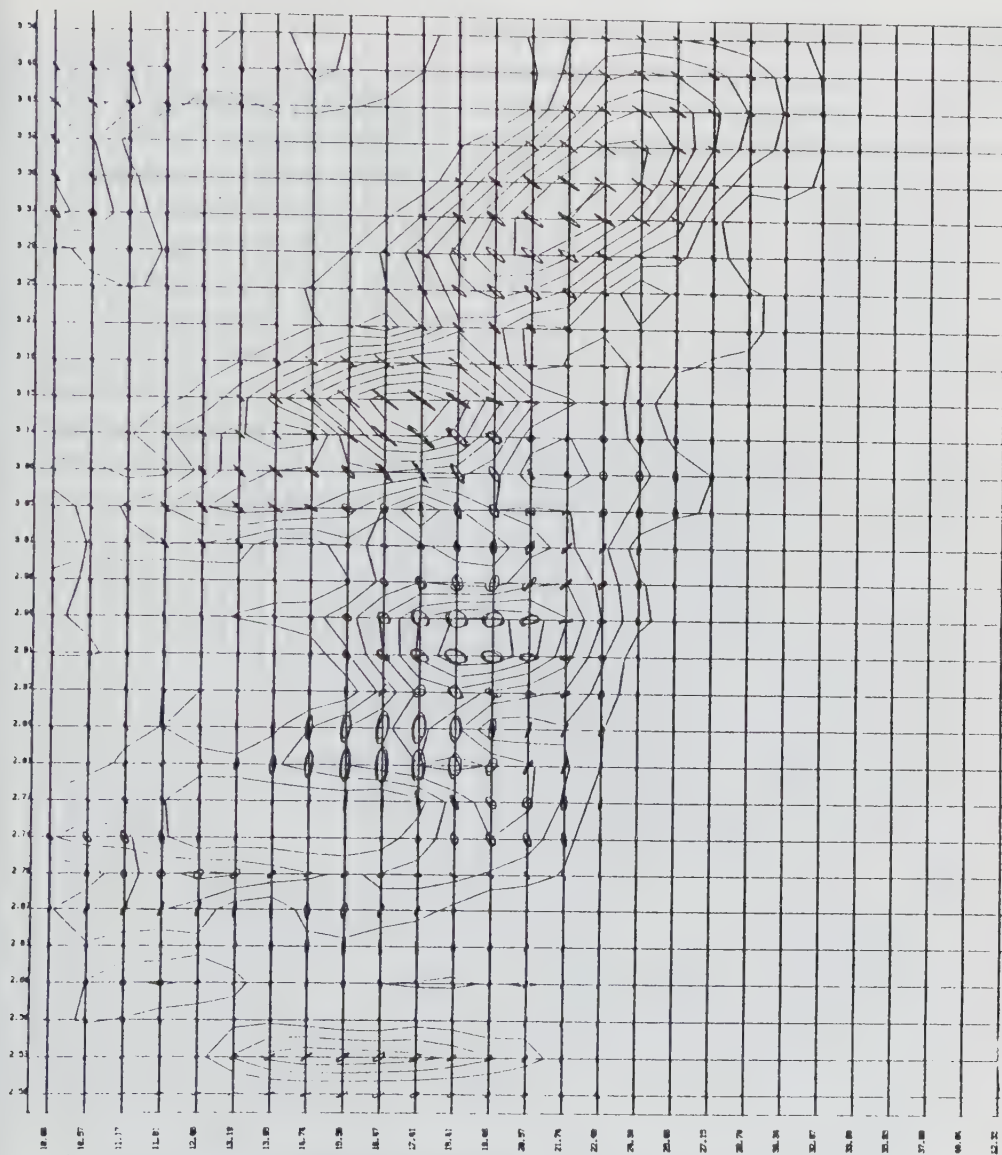
Polarisations-Dispersions-Matrix der Horizontal-Komponenten
der Station A1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: Periode (sec)

Vertikal-Achse : Gruppengesch. (km/sec)



Polarisations-Dispersions-Matrix der Horizontal-Komponenten
der Station B1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: Periode (sec)

Vertikal-Achse : Gruppengesch. (km/sec)

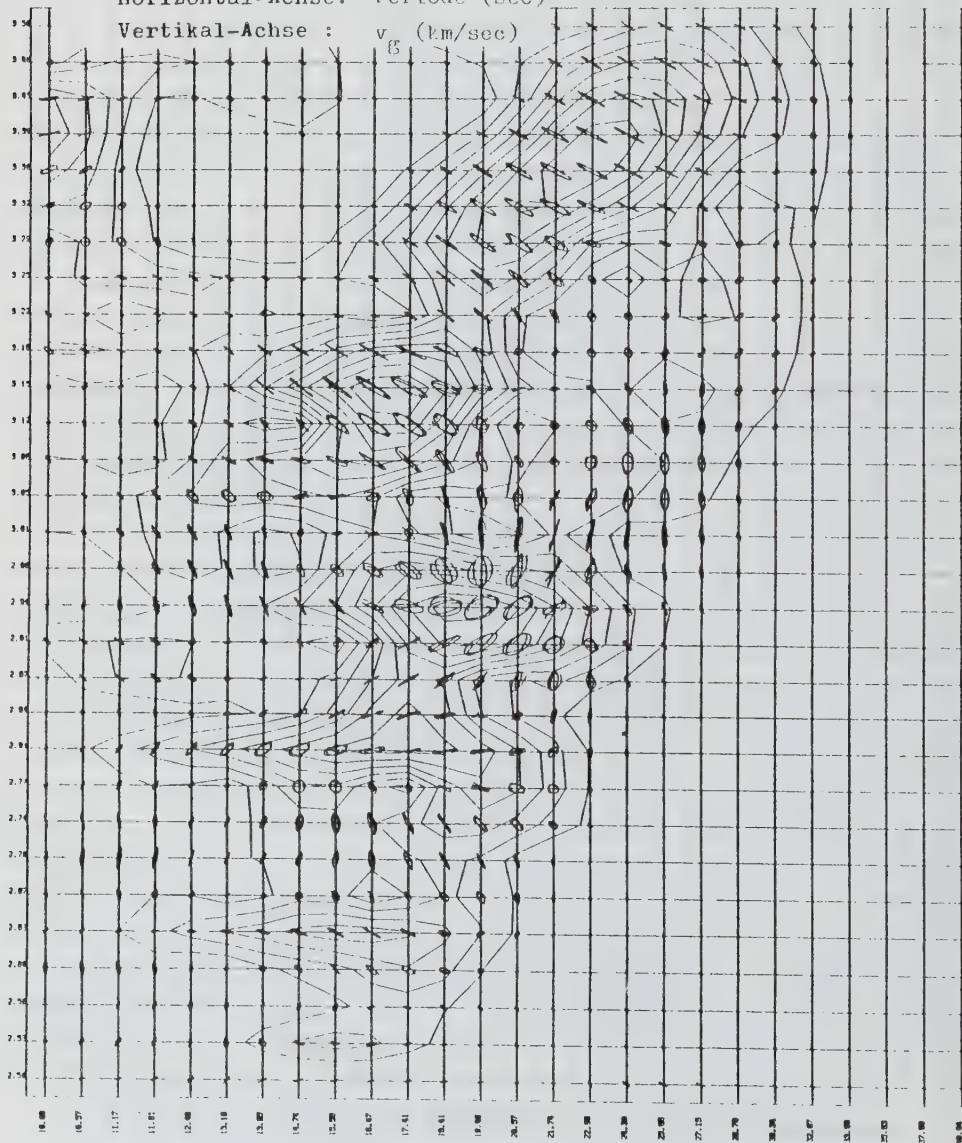
Polarisations-Dispersions-Matrix der Horizontal-Komponenten
der Station C1

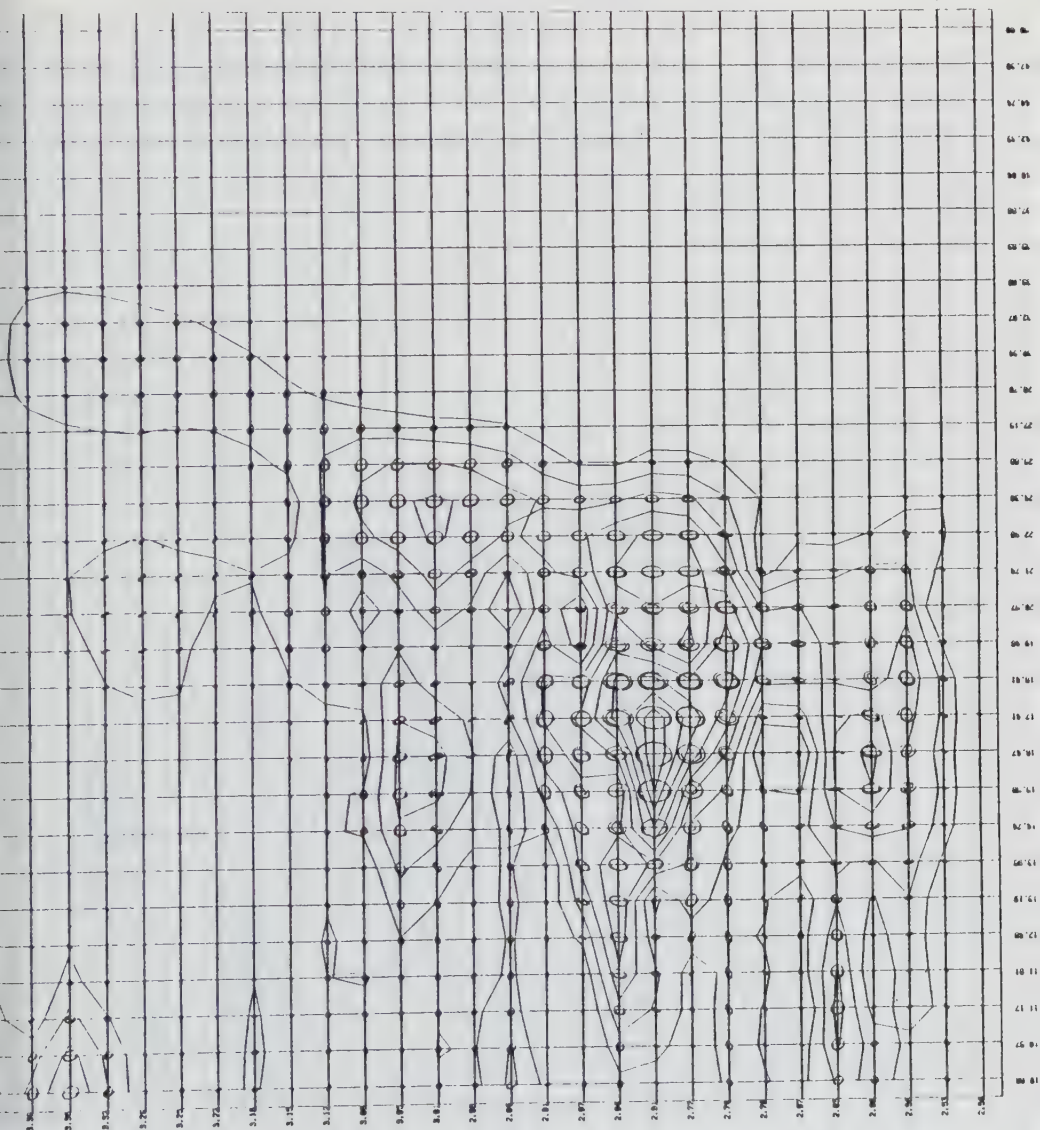
Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: Periode (sec)

Vertikal-Achse : v_B (km/sec)



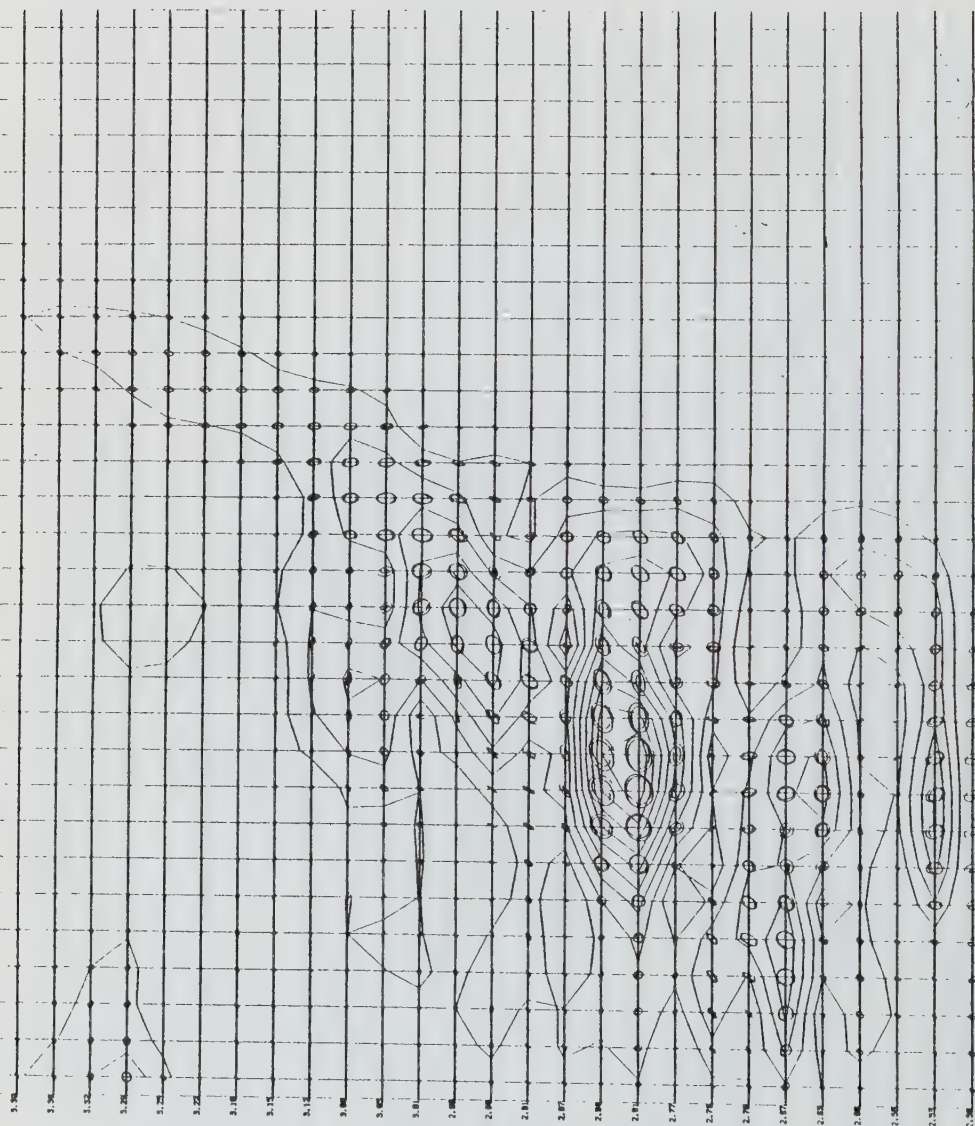


Polarisations-Dispersions-Matrix der Z- und R-Komponente
der Station A1

Orientierung der Hodographen :

Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)



Polarisations-Dispersions-Matrix der Z- und R-Komponente
der Station B1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)

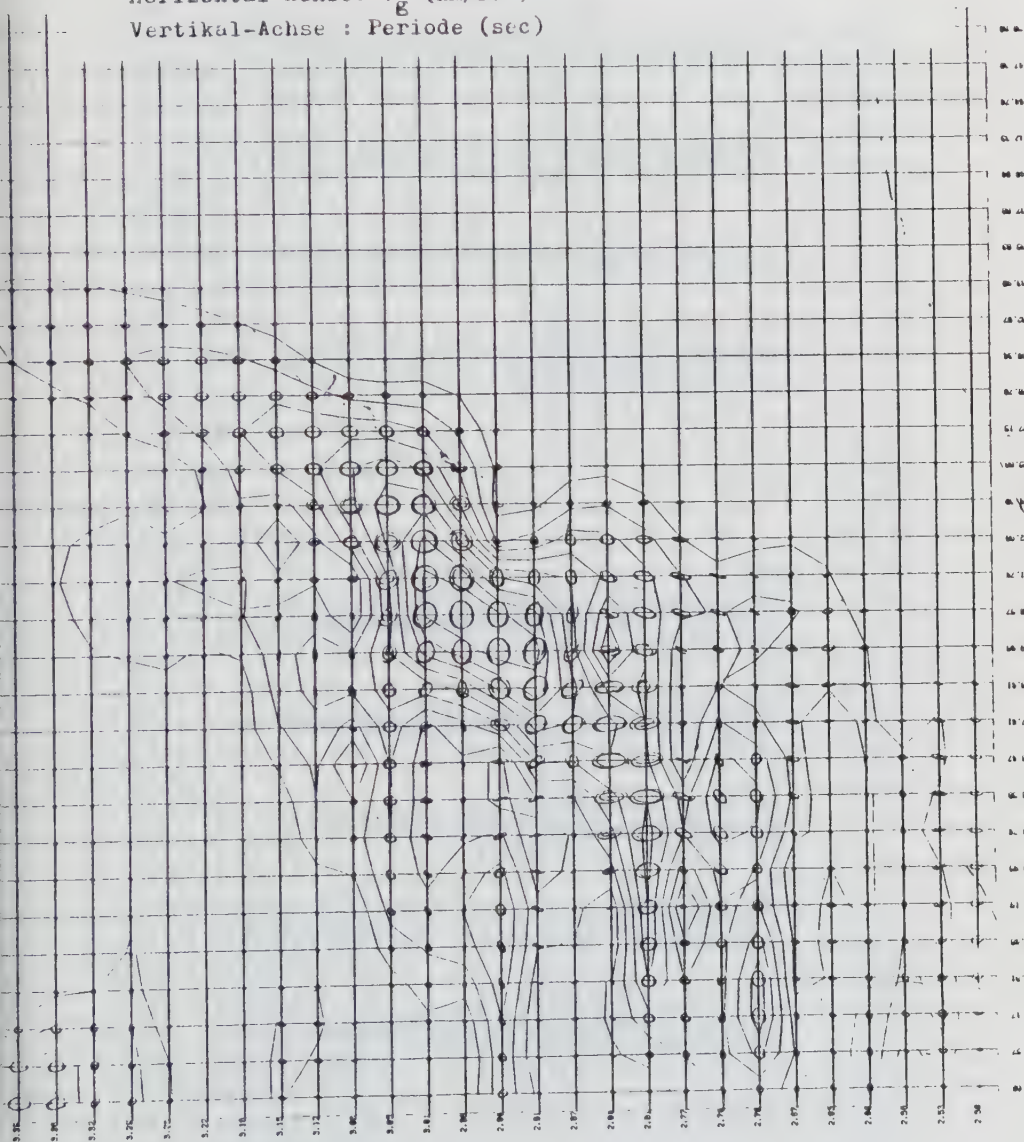
Polarisations-Dispersions-Matrix der Z- und R-Komponente
der Station C1

Orientierung der Hodographen :



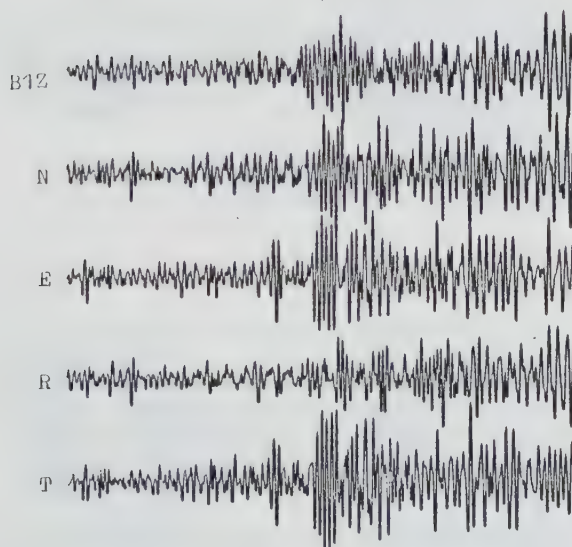
Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)

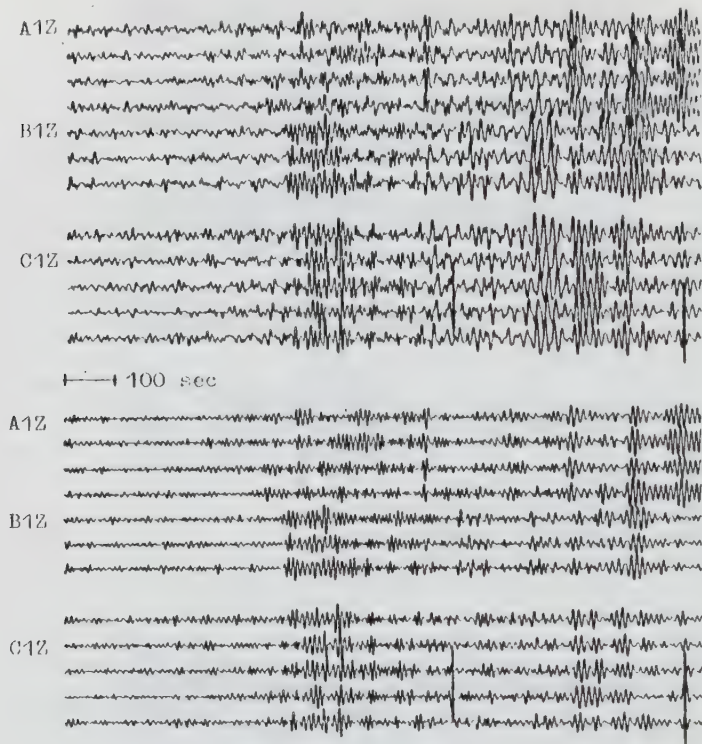


Hokkaido

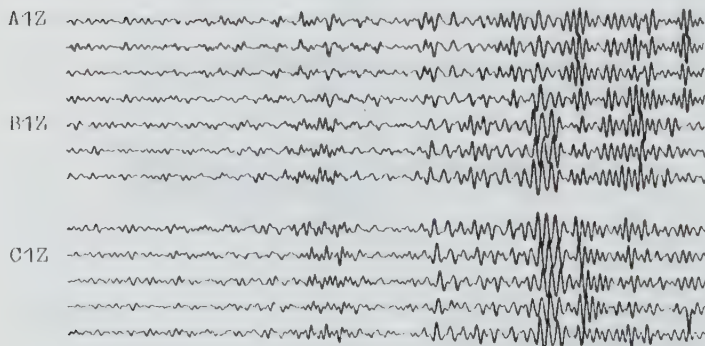
Die 3-K-Registrierungen, die in dem, dem Geschwindigkeitsintervall 4.-2.7 km/sec entsprechenden Zeitausschnitt gezeichnet sind, zeigen etwa in der Mitte des Ausschnitts mehrere hochfrequente Wellenzüge. Einziger Hinweis auf eine Dispersion sind die etwas längeren Perioden gegen Ende des Ausschnitts. Wie aus der DA der Z-Komponenten klar wird, ist sehr wohl eine deutlich disperierte R0-Mode vorhanden, die jedoch völlig von dem hochfrequenten "Rauschen" verdeckt wird, der sich als Lg-Phase herausstellt. Der starke Anteil der Lg-Phase in den H-Komponenten macht klar, daß an der Entstehung der Lg-Phase nicht nur höhere Rayleigh-Moden, sondern auch höhere Love-Moden beteiligt sind. Die relativ großen Amplituden der R0-Mode bei ca. 50 sec ohne Berücksichtigung der Geophon-Charakteristik läßt auf eine Erweiterung des beobachtbaren Periodenbereichs nach der Signalrestoration hoffen. In den PDMs der H-Komponenten herrscht eine den Love-Wellen zuzuordnende Polarisation vor. An beiden Stationen (A1,B1) ist bei Perioden zwischen 15 und 20 sec bei Geschwindigkeiten um 3.14 km/sec lineare Polarisation mit einem Azimut von 45 grd W zu beobachten, was 10 grd weniger ist, als nach dem geographischen Azimut zu erwarten. In der Montage aller Z-Komponenten ist die Lg-Phase deutlich, wenngleich auch inkohärent zu erkennen. Von der R0-Mode ist bei den Subarrays B und C lediglich die Airy-Phase bei der Zeitmarke 900 zu sehen. Ihr folgen in der Coda Wellenpakete einer mittleren Periode von 12 sec, die sich oft über einen großen Teil des Arrays verfolgen lassen. Die Montage der 12.5-sec-HP-gefilterten Z-Seismogramme unterstreicht lediglich den inkohärenten Charakter der Lg-Phase in diesem Periodenbereich. Eine 10-sec-TP-Filterung zeigt zwischen der Lg-Phase und der Airy-Phase der R0-Mode mehrere Wellengruppen und hebt das unterschiedliche Aussehen der Seismogramme des A-Subarrays hervor. Die wK zeigt bei Perioden < 25 sec Schwankungen, die bei längeren Perioden geringer werden. Die Azimute sind durchweg zu klein, nähern sich aber bei längeren Perioden dem geographischen. Die mittlere Richtung bei geringen Perioden steht etwa senkrecht auf der der Love-Wellen-Polarisation. Die in der TP-gefilterten Montage markierten Wellengruppen wurden ebenfalls wK analysiert. Dabei zeigen die Wellengruppen außer der Airy-Phase und dem unmittelbar anschließenden ersten Teil der Coda entweder beträchtliche azimutale Mißweisungen oder Ausbreitung über multiple Wege. Die Drehung der H-Komponenten bringt im Zeitbereich keine sichtbare Verbesserung, wohl aber bei der DA, bei der die R-Komponenten einen ebenso ausgeprägten Dispersionsast zeigen, wie die Z-Komponenten. Unter Einrechnung der inversen Geophon-Charakteristik sind noch bis 100 sec Periode deutlich Amplituden ohne Interferenzminima oberhalb Perioden von 30 sec zu beobachten. Bei den T-Komponenten ist nun auch der Dispersionsast der L0-Mode zu erkennen. Im Gegensatz zur B1-Station gleicht sich der periodenabhängige Verlauf der Elliptizität bei der A1-Station zumindest teilweise dem theoretischen an. Die bei langen Perioden unterschiedlichen Elliptizitätswerte der beiden im Vergleich zur Wellenlänge von einigen 100 km nah benachbarten Stationen können ohne Annahme einer lokalen Heterogenität im Array kaum erklärt werden.



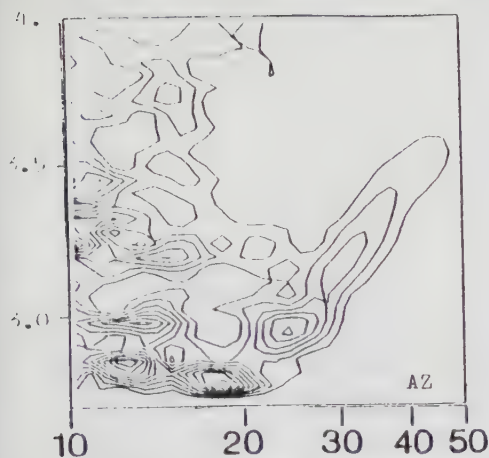
Vertikal-, NS-, EW-, radial- und Transversal-Komponente
der Station A1, B1



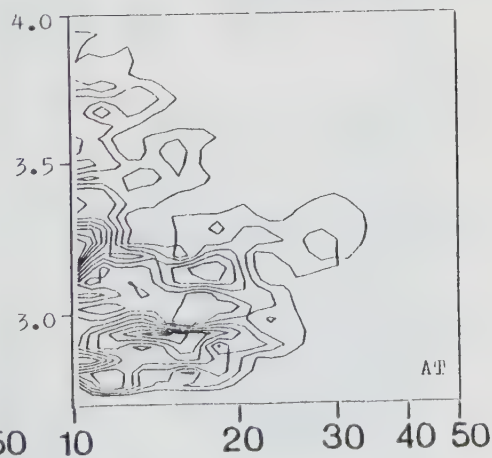
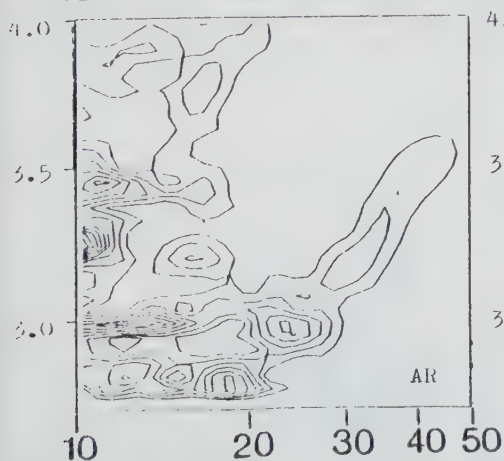
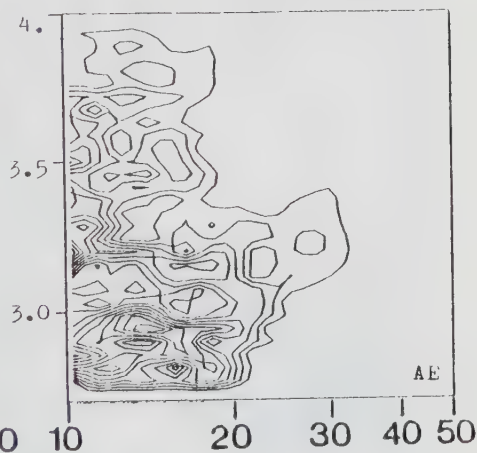
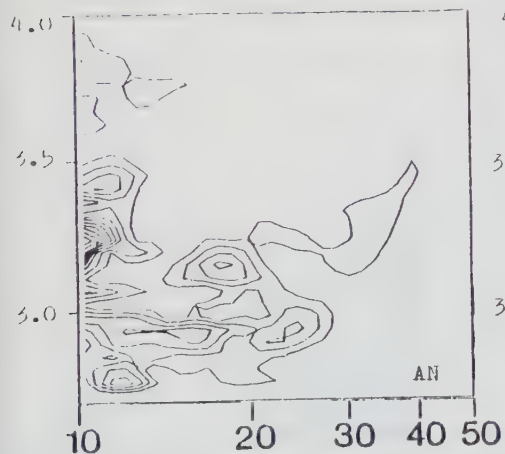
Vertikal-Komponenten der Stationen A1-C4,
12.5sec-HP-gefiltert (darunter)

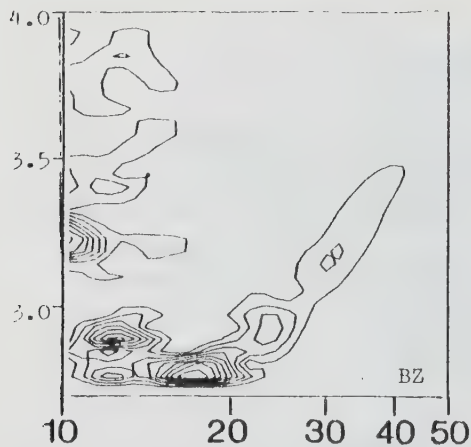


Vertikal-Komponenten der Stationen A1-C4
10sec-TP-gefiltert



Gabor - Matritzen
der Station A1
horizontal : Periode (sec)
vertikal : Gruppengesch.
(km/sec)





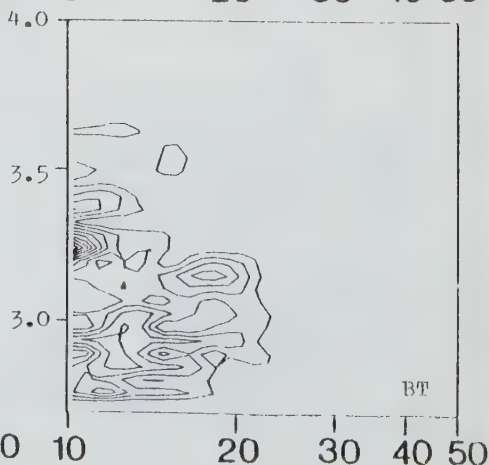
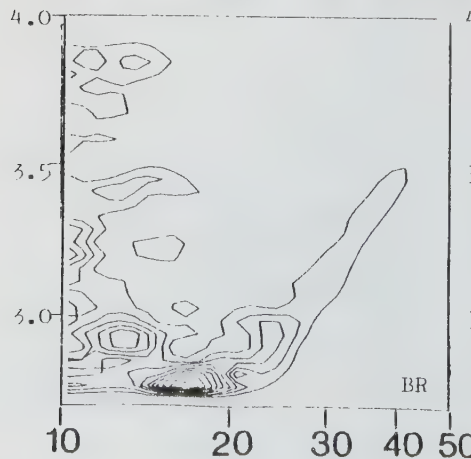
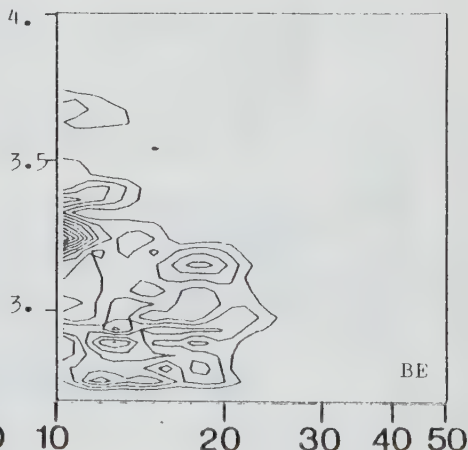
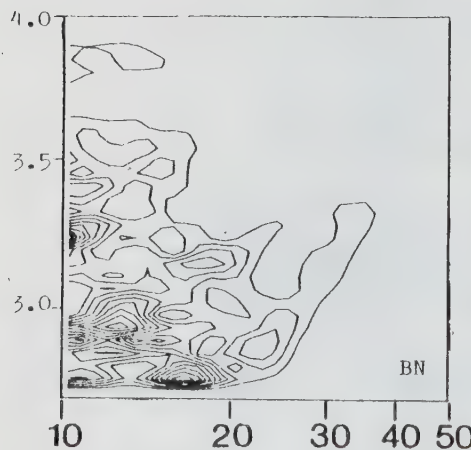
Gabor - Matritzen

der Station B1

horizontal : Periode (sec)

vertikal : Gruppengesch.

(km/sec)



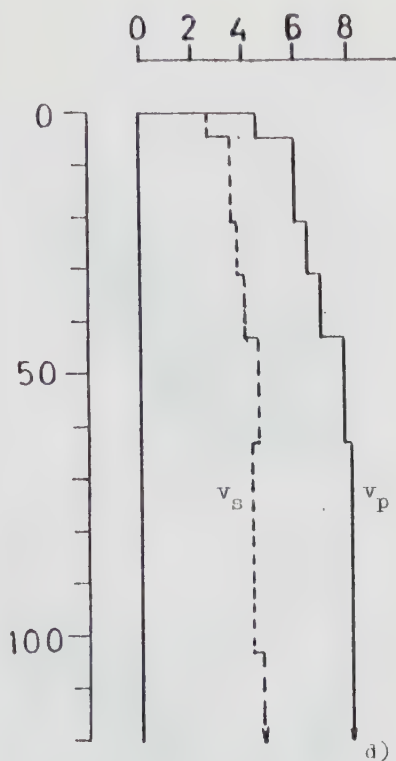
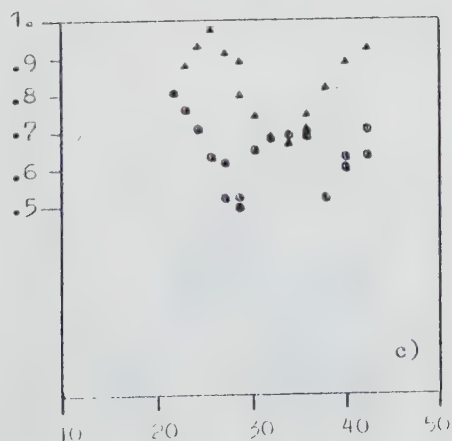
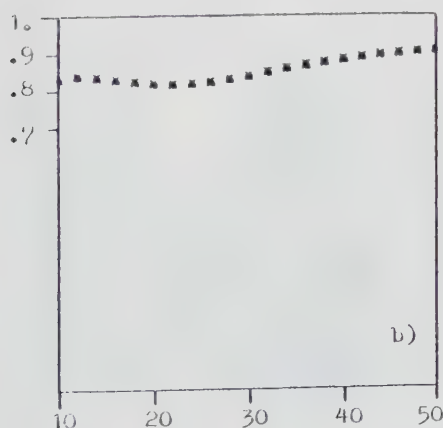
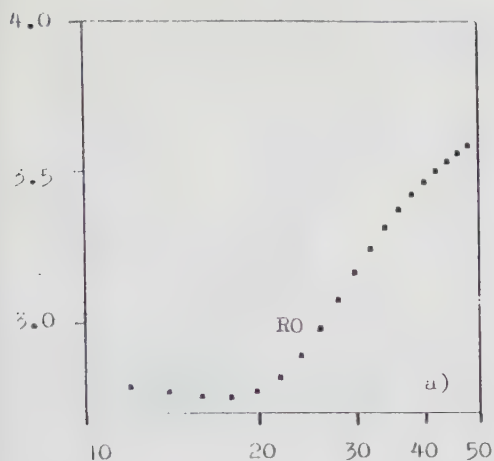
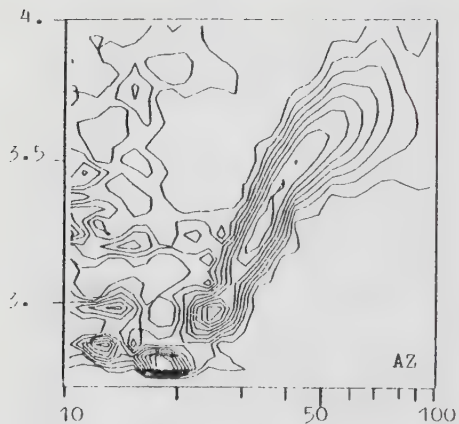


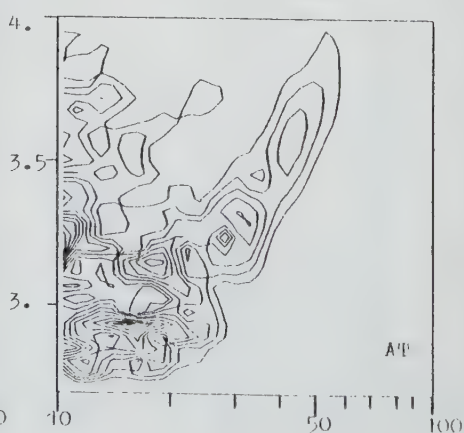
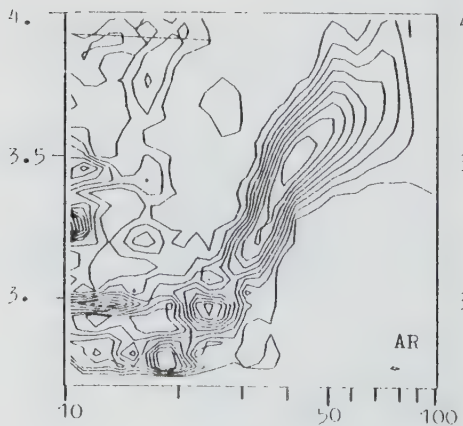
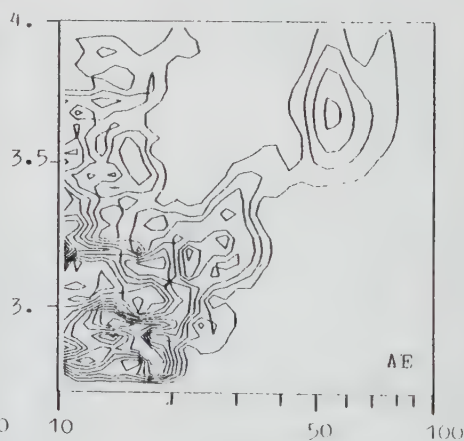
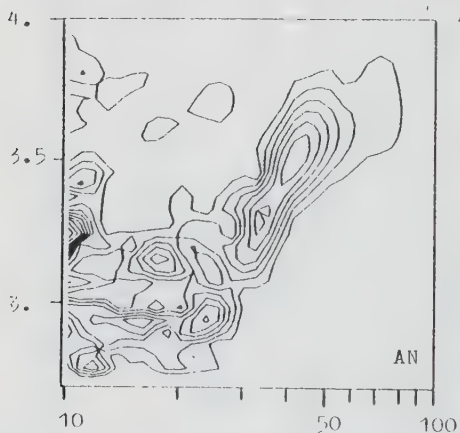
Abb. a) Theoretische Gruppengesch.-Dispersion
horizontal : Periode (sec)
vertikal : v_g (km/sec)

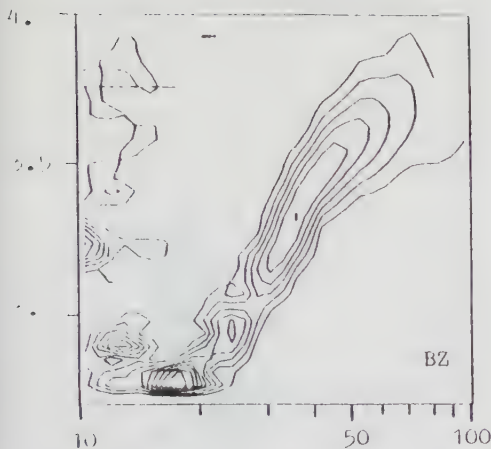
Abb. b) und c)
Theoretische und gemessene Elliptizitäten in Abhängigkeit von der Periode
 $\bigcirc \hat{=} A1$, $\Delta \hat{=} B1$

Abb. d) den theoretischen Kurven zugrundeliegendes Geschwindigkeits-Tiefen-Modell.

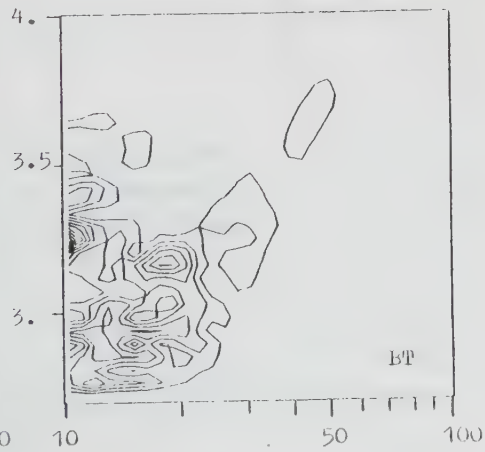
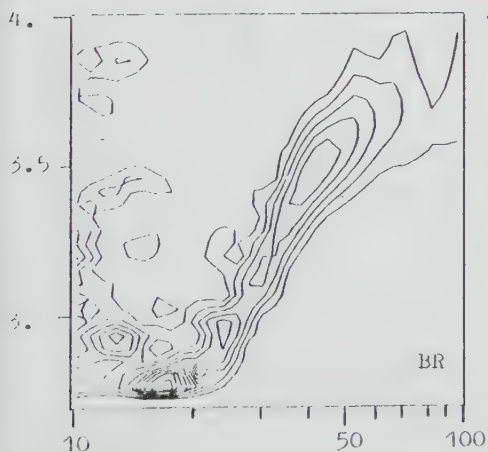
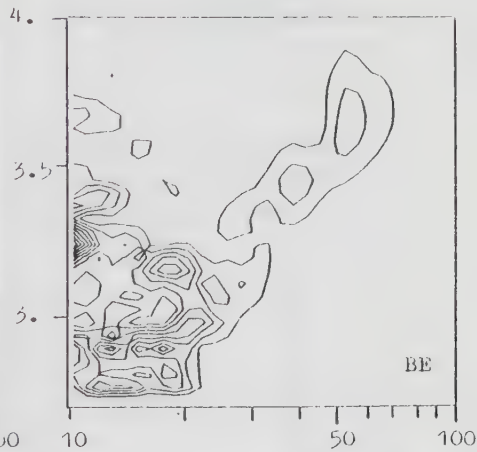
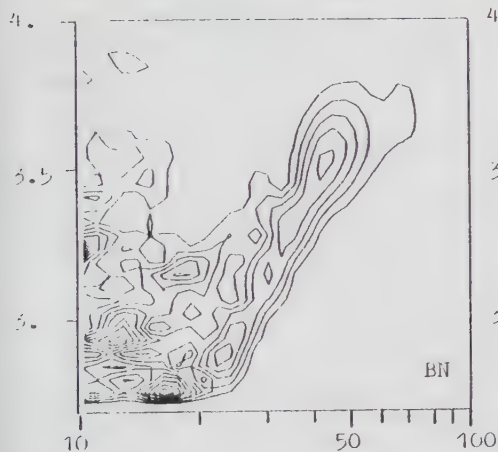


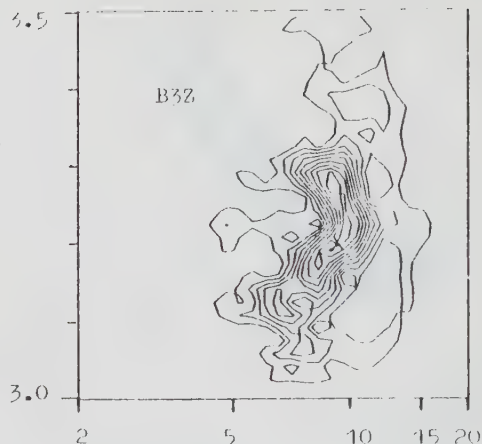
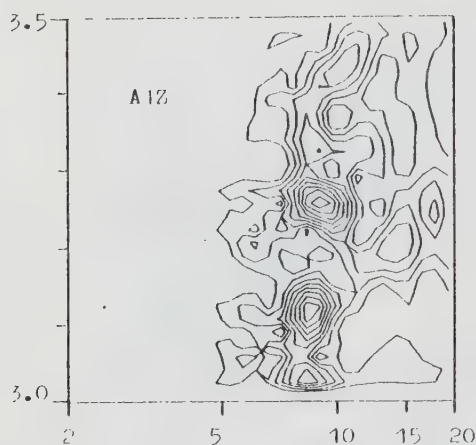
Gabor - Matrizen
der Station A1
horizontal : Periode (sec)
vertikal : Gruppengesch.
(km/sec)





Gabor - Matritzen
 der Station B1
 horizontal : Periode (sec)
 vertikal : Gruppengesch.
 (km/sec)

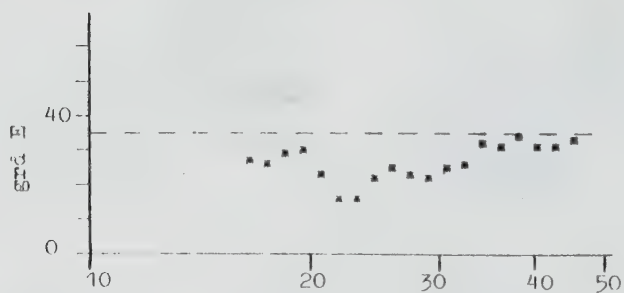




Gabor-Matrizen der höheren Rayleigh-Moden

horizontal : Periode (sec)

vertikal : Gruppengeschwindigkeit (km/sec)



Ankunftsrichtung der RO-Mode in

Abhängigkeit von der Periode

gemäß der ω -k-Analyse

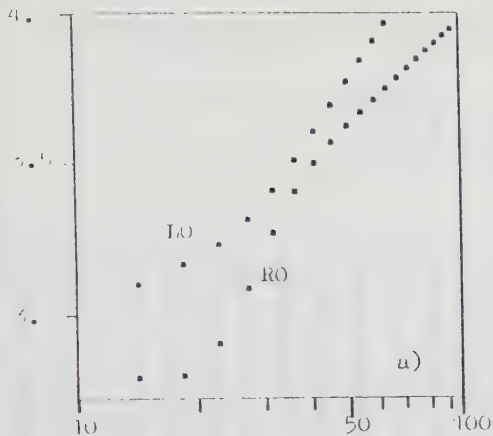
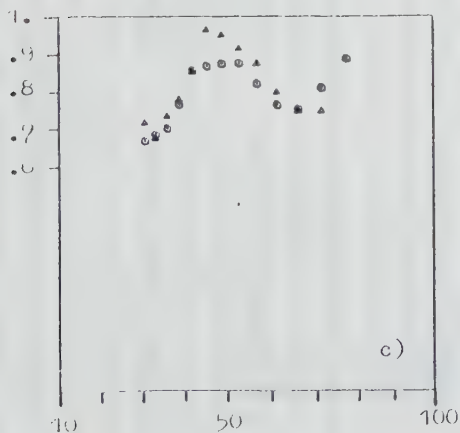
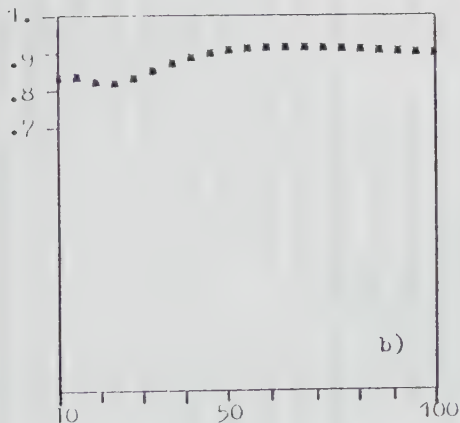


Abb. b) und c)
Theoretische und gemessene
Elliptizitäten in Abhängig-
keit von der Periode
 $\odot \hat{=} A1$, $\Delta \hat{=} B1$



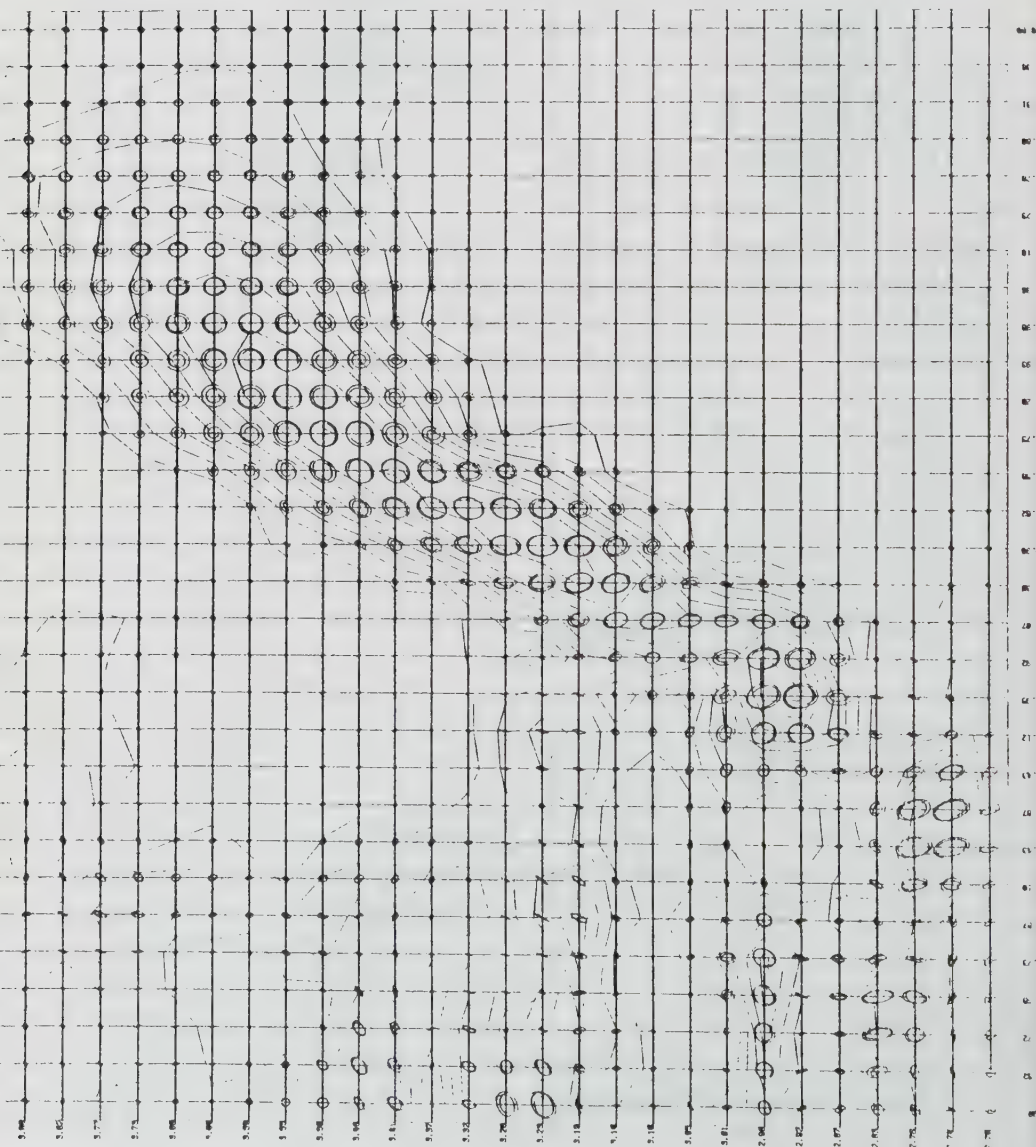
Polarisations-Dispersions-Matrix der Z- und R-Komponente
der Station A1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)



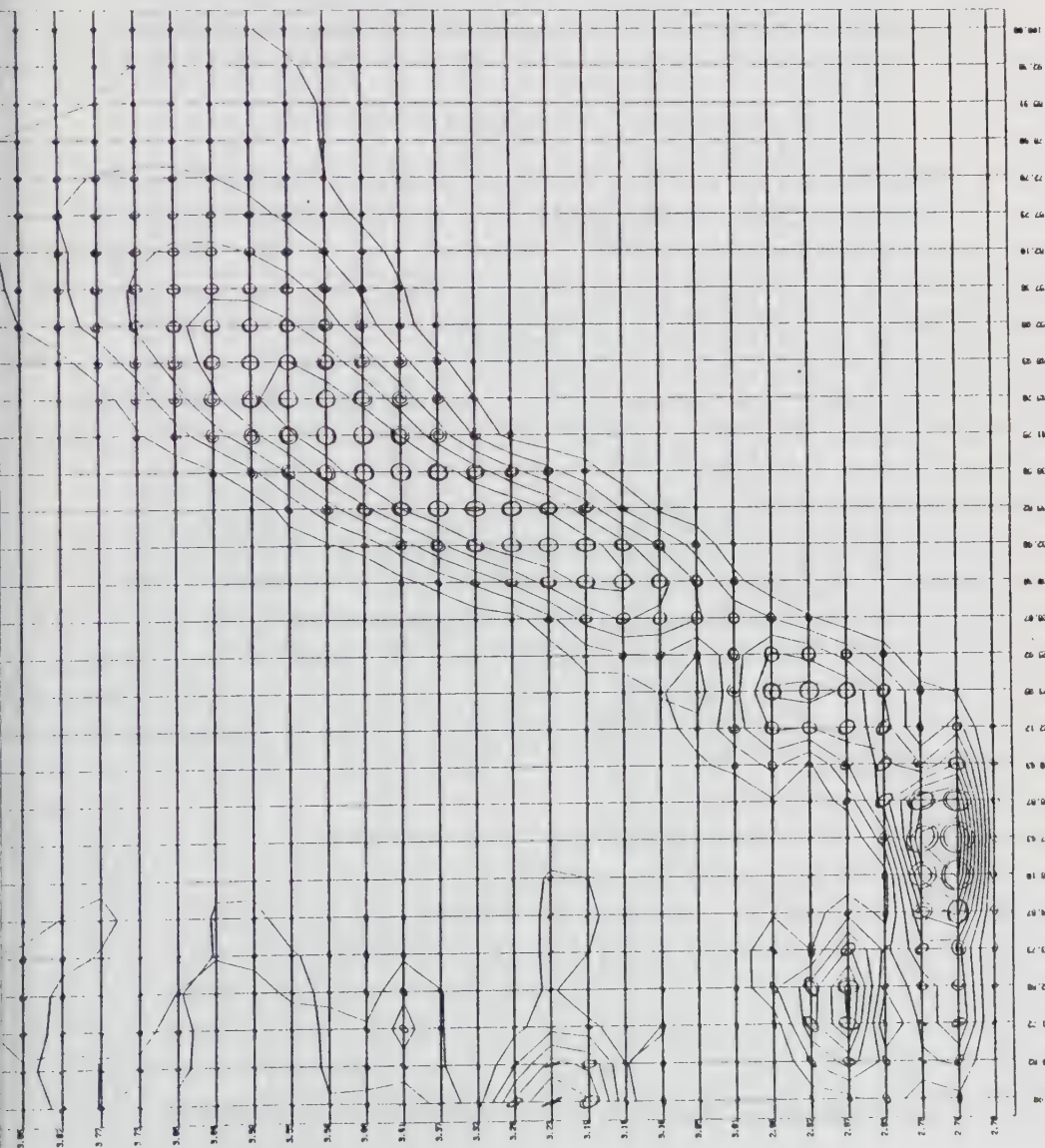
Polarisations-Dispersions-Matrix der Z- und R-Komponente
der Station B1

Orientierung der Hodographen :



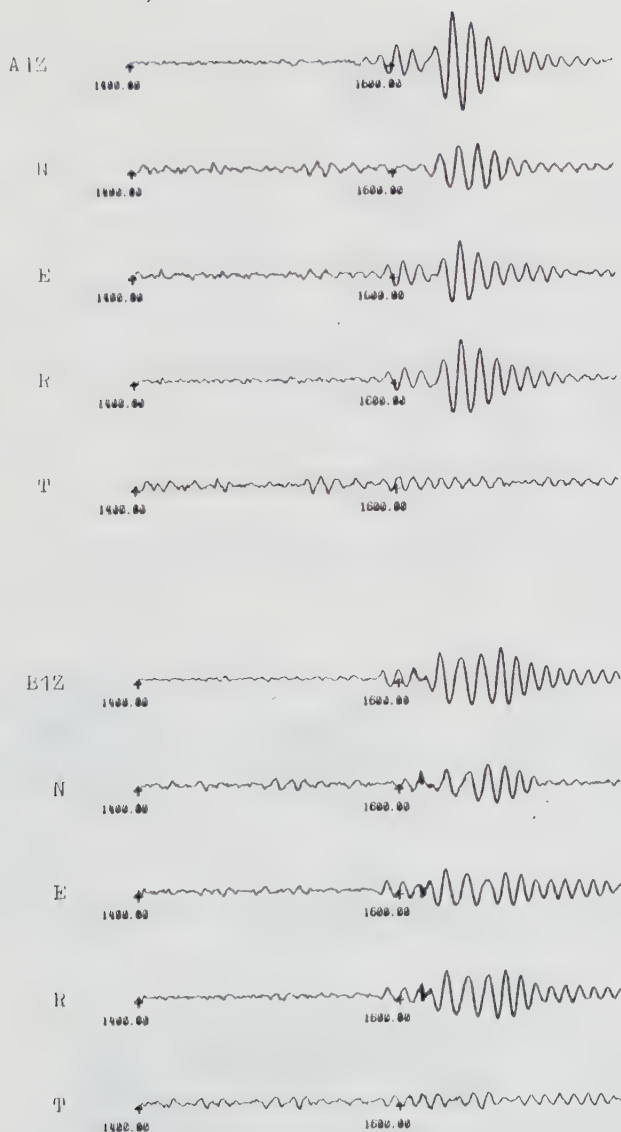
Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)

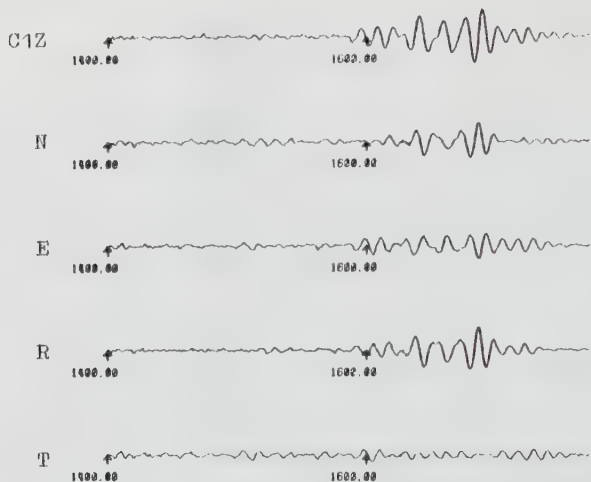


Baikal

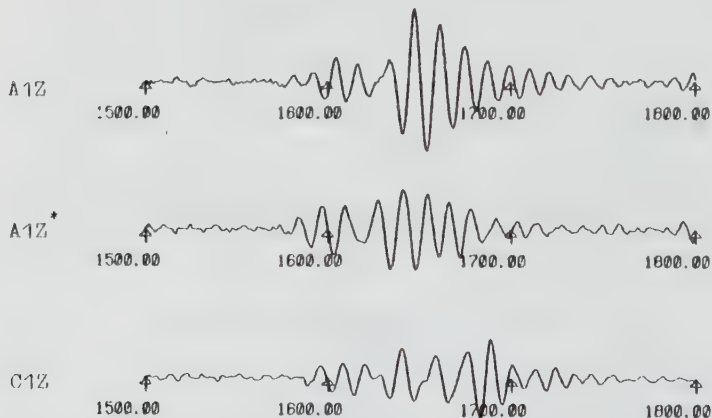
Bereits die 3-K-Registrierungen des Bebens zeigen die graduelle Zersetzung eines an der Station A1 offenbar ungestörten quasi-harmonischen Wellenzugs, der bei der Station C1 deutlich aus mehreren Wellenpaketen aufgebaut erscheint. Im B-Subarray wurde kurz nach der Zeitmarke 1600 ein lokales Ereignis registriert. In der PDM der A1-Station erscheint die R0-Welle als recht kompaktes Energiepaket ohne deutliche Dispersion, die man klarer an der C1-Station zu sehen glaubt, hier jedoch mit eindeutigen Interferenzeffekten verbunden. Die Polarisation in der Horizontalen ist vor allem zu längeren Perioden hin lehrbuchartig linear und stimmt mit dem geographischen Azimut überein, wenn man davon absieht, daß bei der Station C1 eine Komponente verpolt ist. Bei höheren Geschwindigkeiten ist mit geringer Amplitude und ebenfalls ohne deutliche Dispersion eine Love-Welle zu identifizieren. Auch die Polarisation der H-Komponenten erbringt ein Indiz für die Wellenausbreitung über multiple Wege durch das damit verbundene Öffnen und Schließen der Schwingungsellipsen, was durch unterschiedliche Phasengeschwindigkeiten der Wellenteile hervorgerufen wird. Die wKA weist bei Perioden < 12 sec mehrere Maxima auf, wovon eines etwa in der Richtung des geographischen Azimuts liegt, die anderen aber nicht eindeutig den zweiten Wellenweg bestimmen lassen. Bei Perioden > 13 sec ist die Abweichung vom geographischen Azimut recht gering. Die Drehung der H-Komponenten erbringt eine sehr gute Trennung von Rayleigh- und Love-Anteilen, wobei die Love-Welle mit relativ kleinen Amplituden jedoch nur an der Station A1 sich aus dem Noise heraushebt. Wie auch aus den Gabor-Matrizen ersichtlich, zeigt sie keine deutliche Dispersion. Die Schwingungsellipsen in der Saggital-Ebene sind im Bereich maximaler Energie wenig geneigt. Die Halbachsen-Verhältnisse der Stationen B1 und C1 sind bei Perioden > 10 sec sehr ähnlich, die der A1-Station weicht davon ab. Da die Dispersion der Welle zu schwach ist, um daraus ein Modell zu berechnen, konnte auch kein Vergleich mit theoretischen Elliptizitäten angestellt werden.



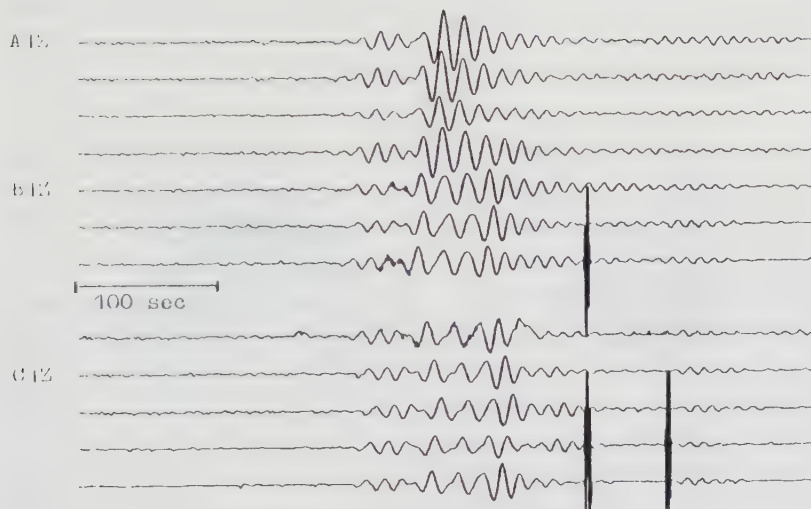
Vertikal-, NS-, EW-, Radial- und Transversal-Komponente
der Station A1, B1



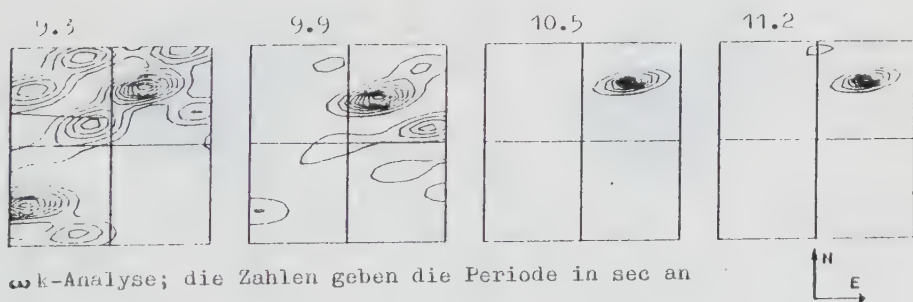
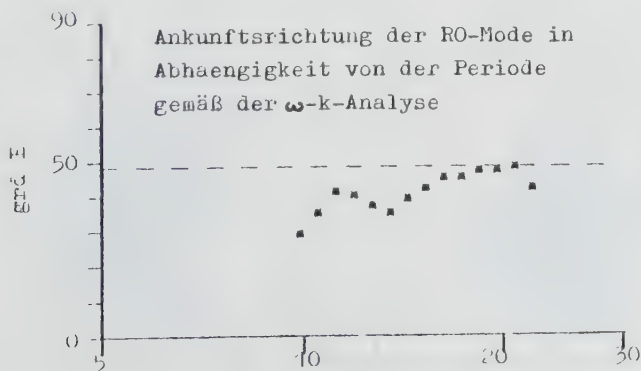
Vertikal-, NS-, EW-, Radial- und Transversal-Komponente
der Station C1



Beispiel für den Signalaufbau durch "Multipathing".
Subtraktion der zeitverschobenen Spur A1Z von C1Z
ergibt die Spur A1Z^{*}, deren Signalform sehr der von
A1Z gleicht.



Vertikal-Komponenten der Stationen A1-C4

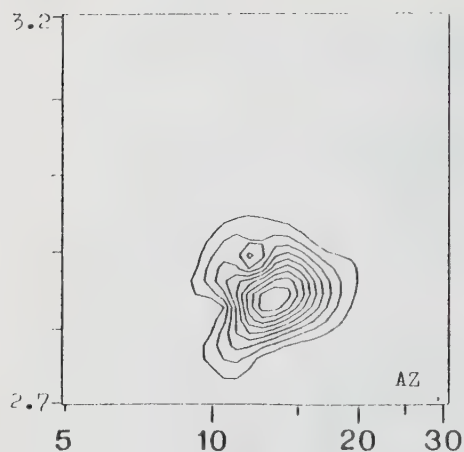
 ω -k-Analyse; die Zahlen geben die Periode in sec an

Baikal

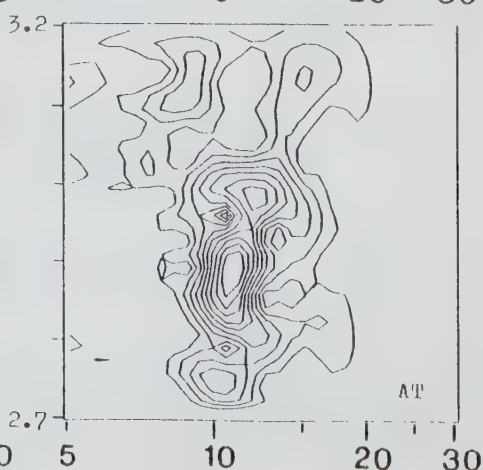
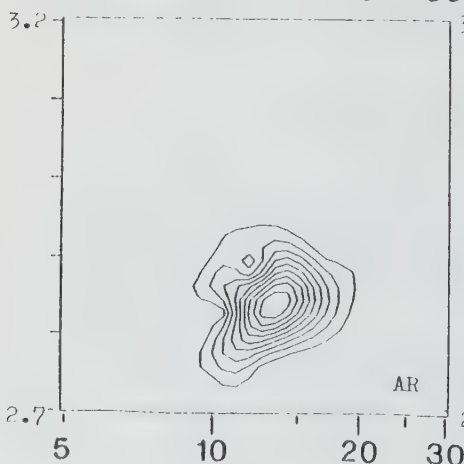
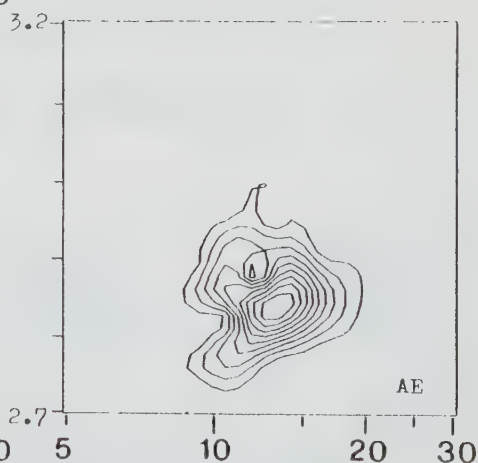
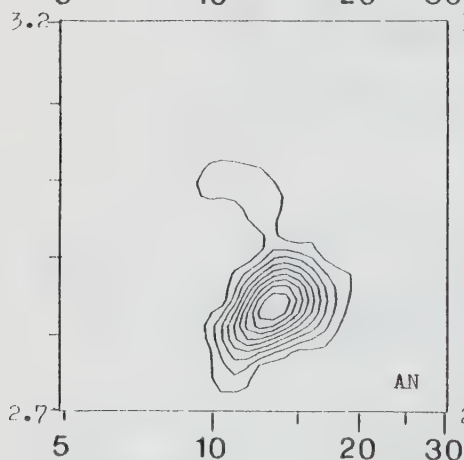
22.5.81

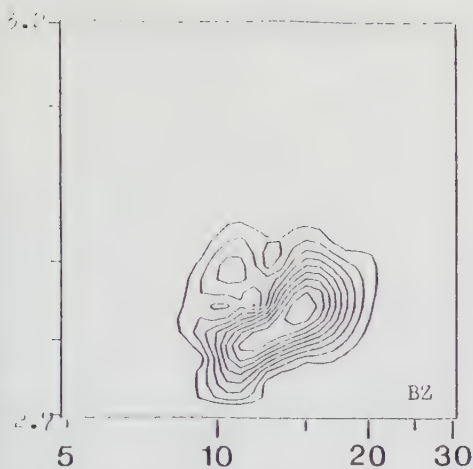
9:51:20.0

52.00 N 105.76 E

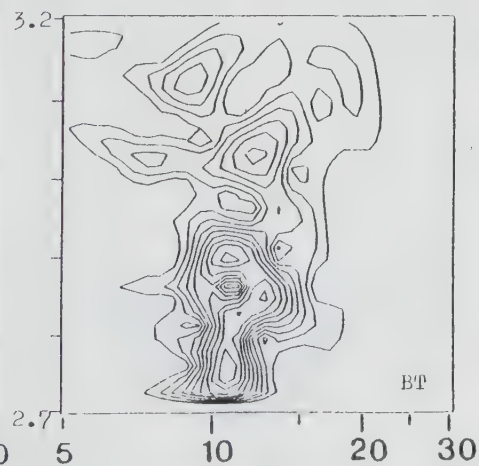
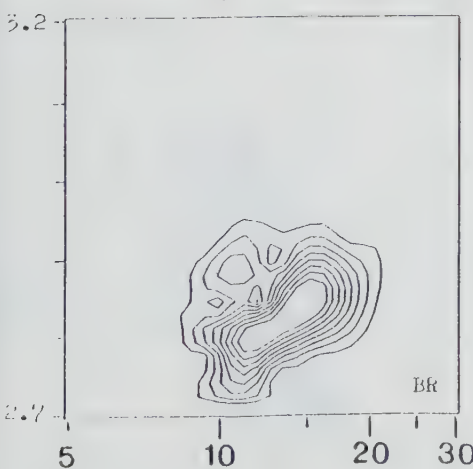
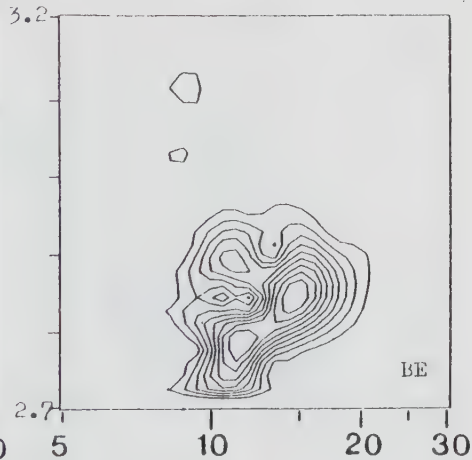
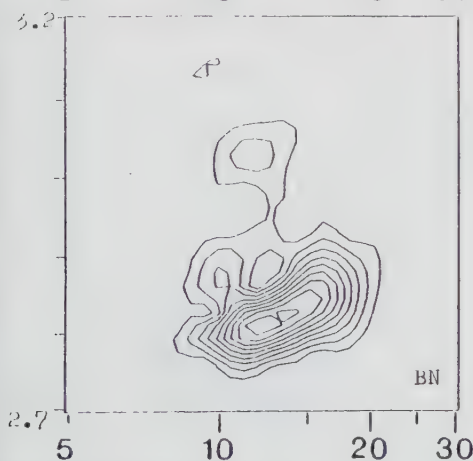


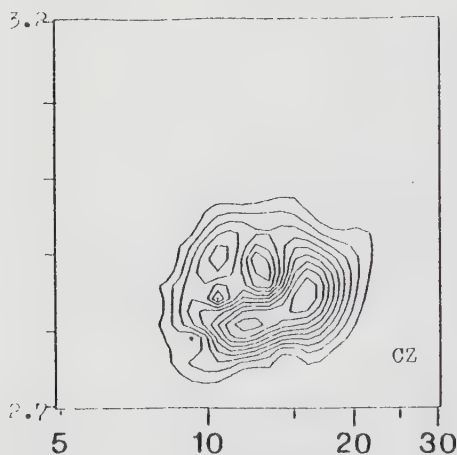
Gabor - Matrizen
der Station A1
horizontal : Periode (sec)
vertikal : Gruppengesch.
(km/sec)



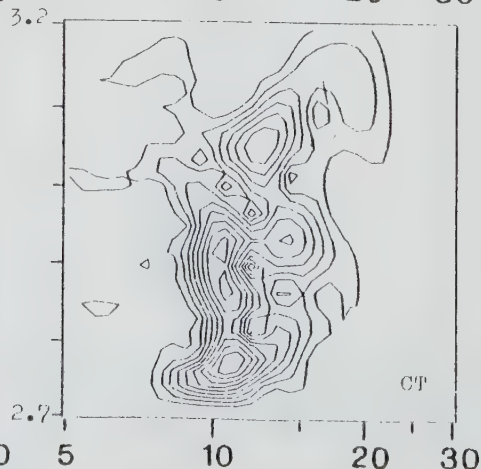
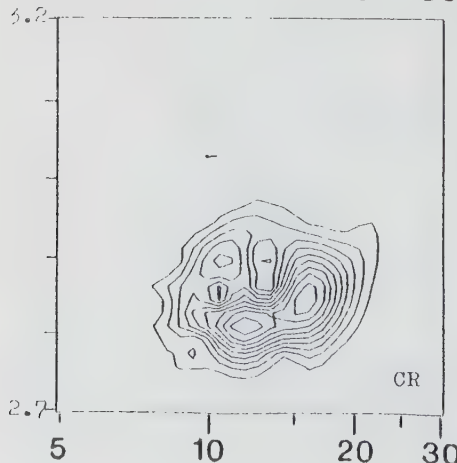
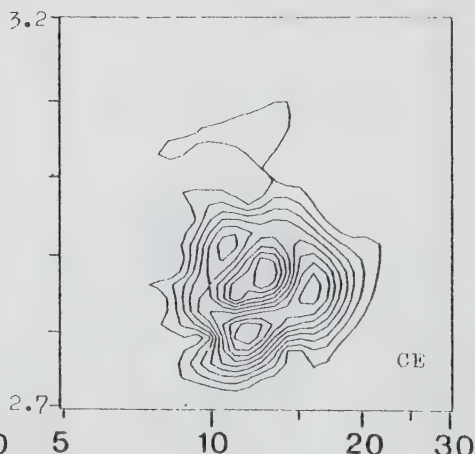
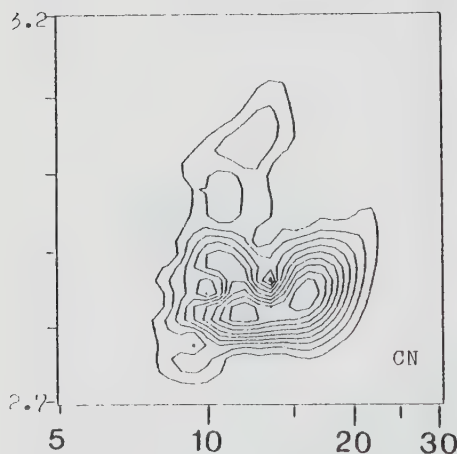


Gabor - Matritzen
der Station B1
horizontal : Periode (sec)
vertikal : Gruppengesch.
(km/sec)





Gabor -Matritzen
der Station C1
horizontal : Periode (sec)
vertikal : Gruppengesch.
(km/sec)



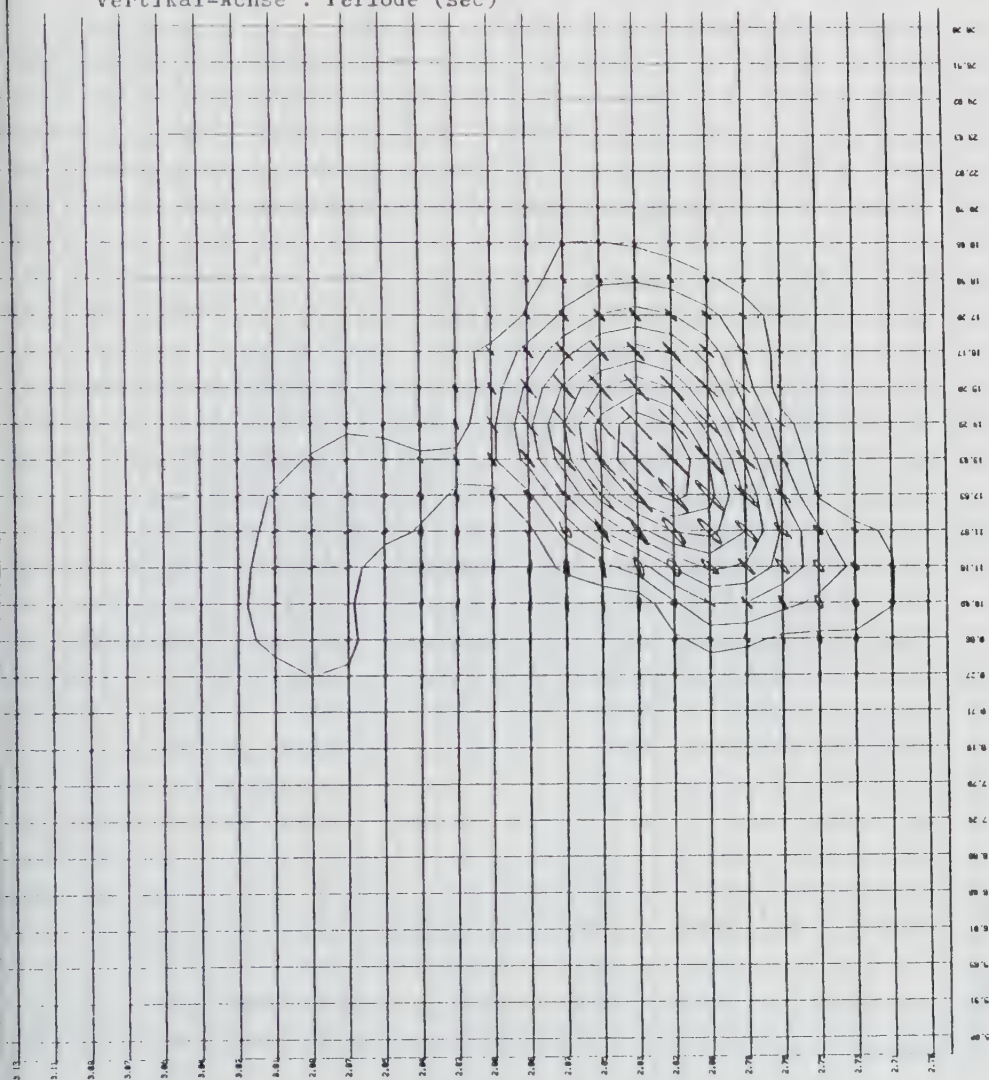
Polarisations-Dispersions-Matrix der Horizontal-Komponenten
der Station A1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_E (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)



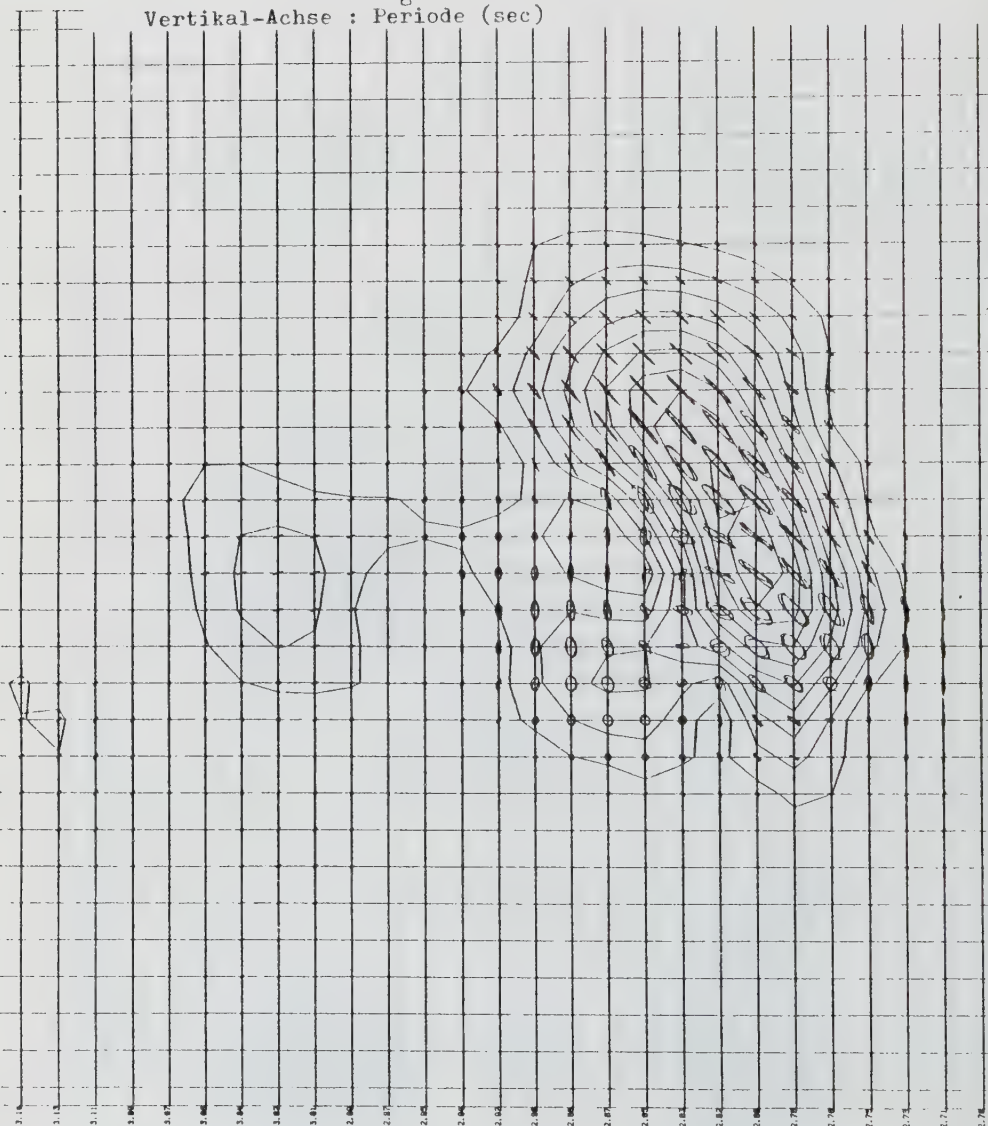
Polarisations-Dispersions-Matrix der Horizontal-Komponenten
der Station B1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_E (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)



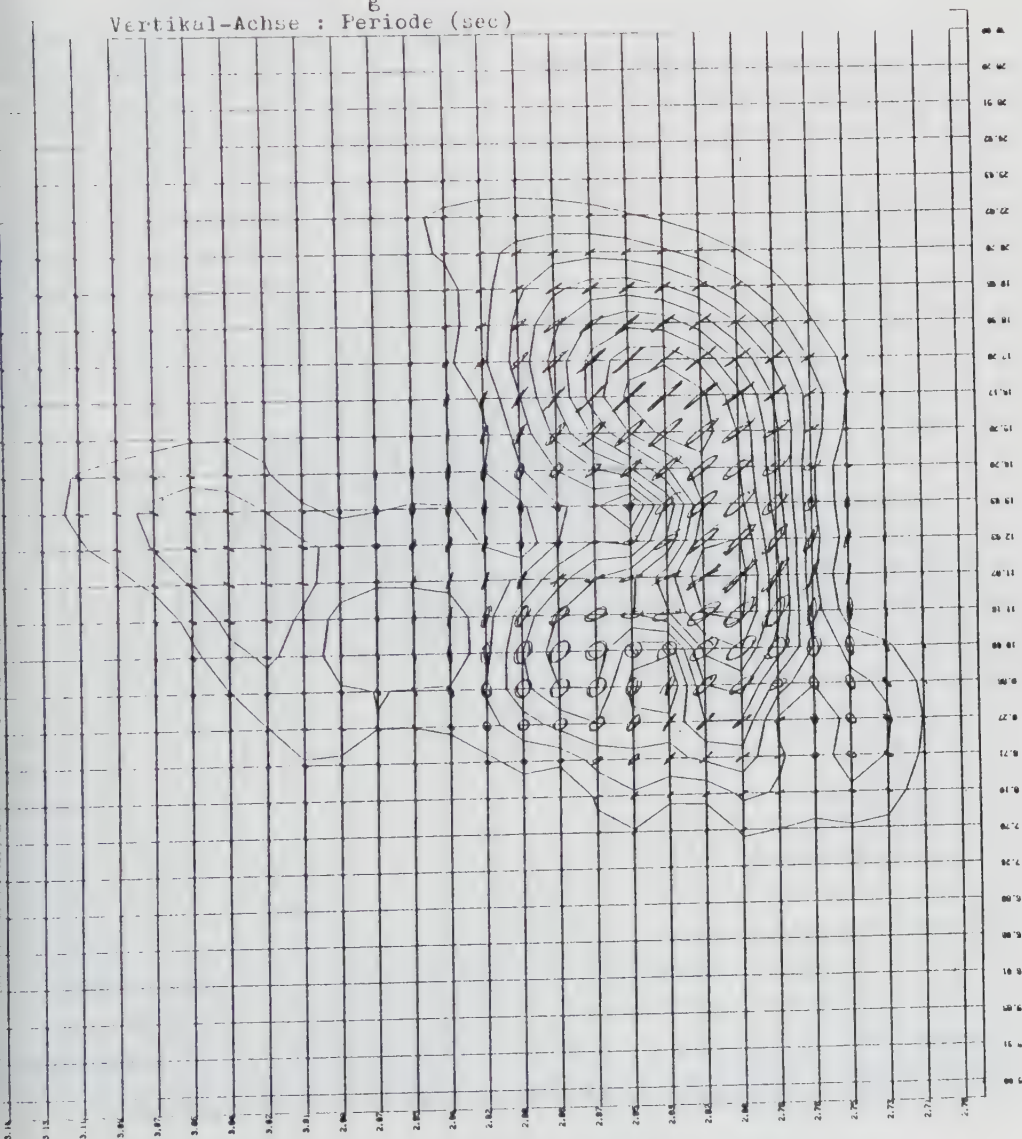
Polarisations-Dispersions-Matrix der Horizontal-Komponenten
der Station C1

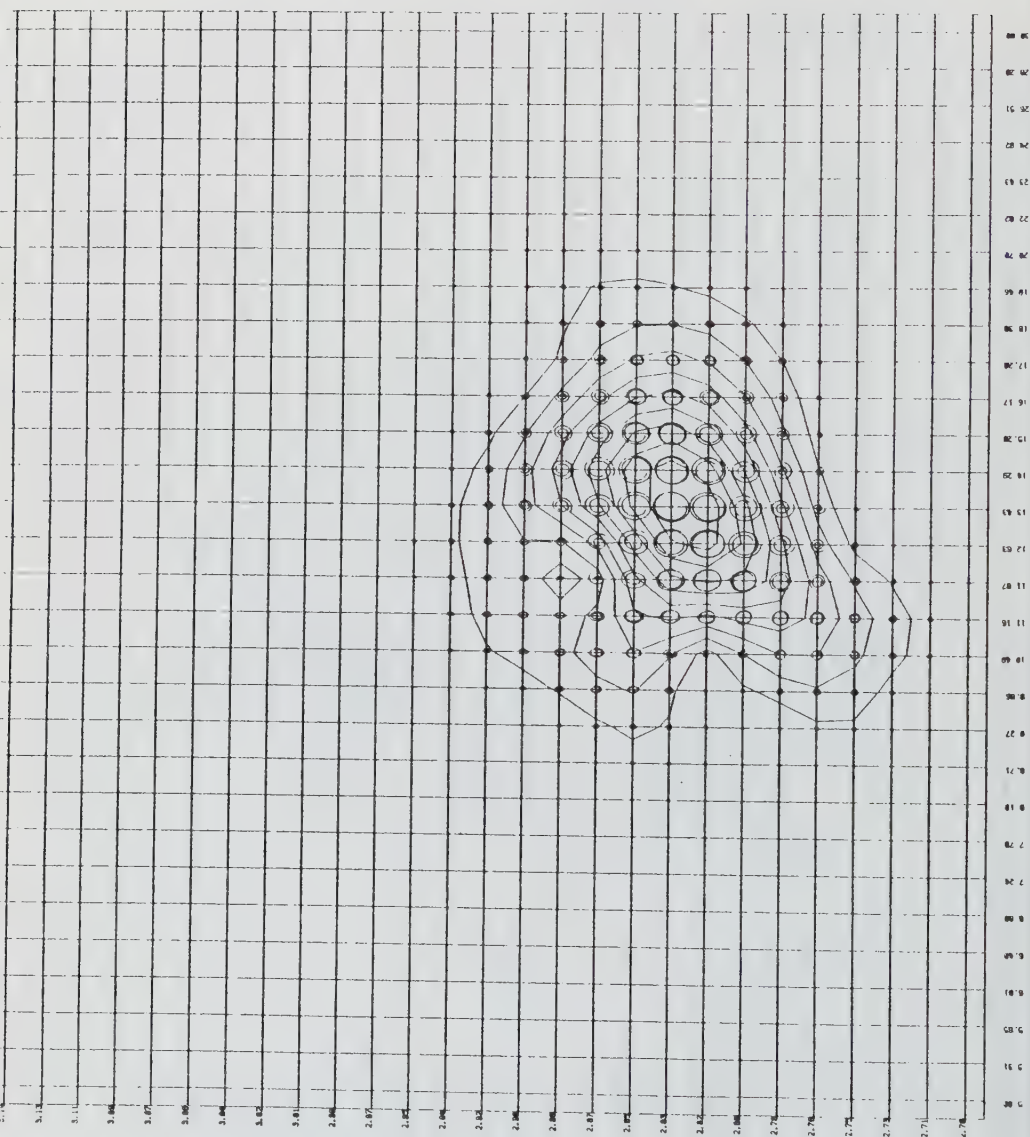
Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)





Polarisations-Dispersions-Matrix der Z- und R-Komponente
der Station A1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)

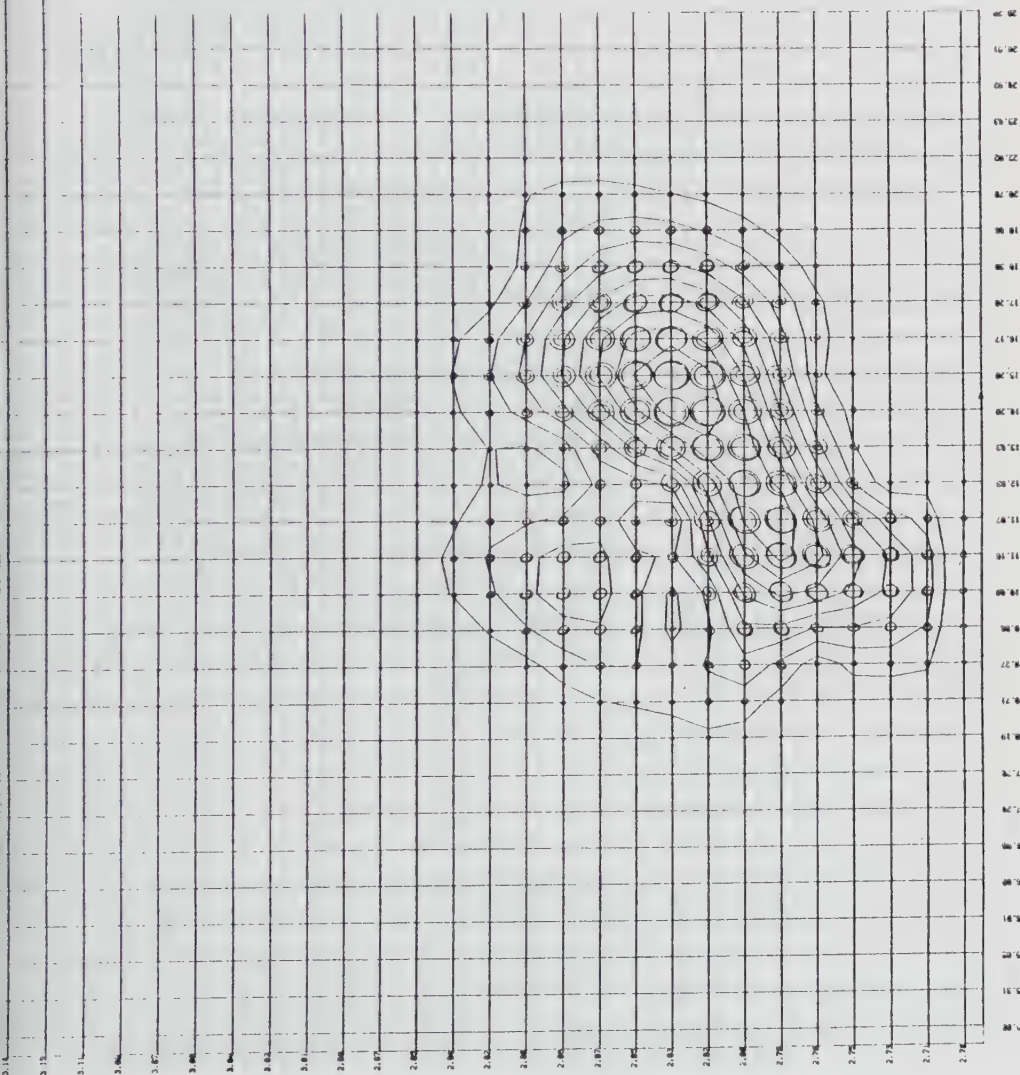
Polarisations-Dispersions-Matrix der Z- und R-Komponente
der Station B1

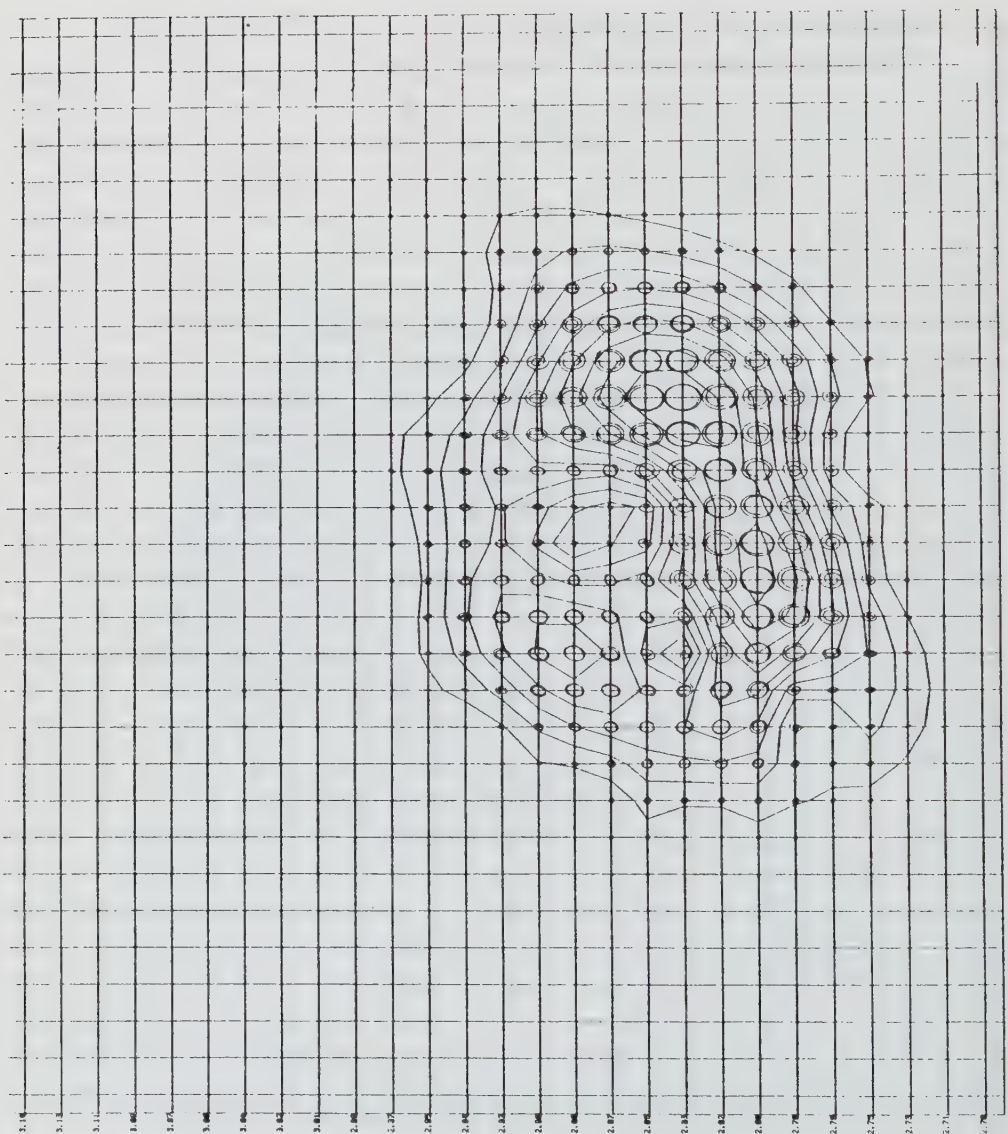
Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)





Polarisations-Dispersions-Matrix der Z- und R-Komponente
der Station C1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

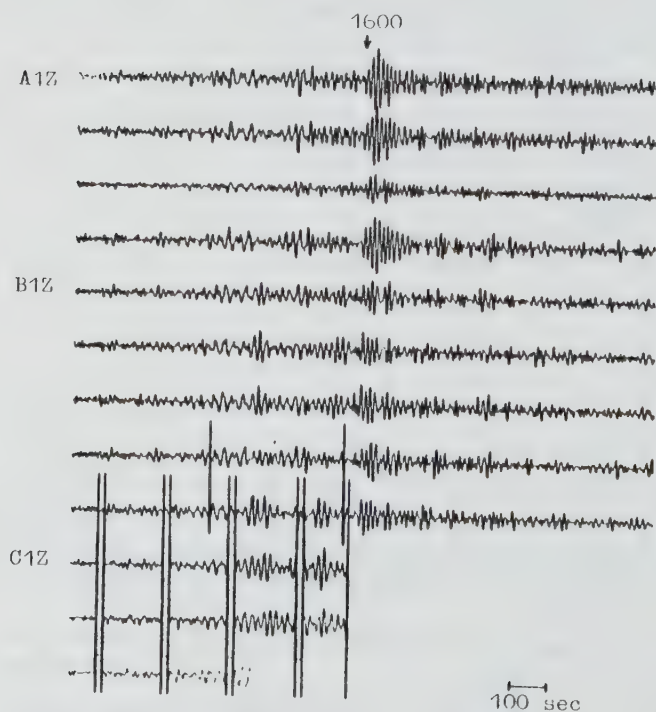
Vertikal-Achse : Periode (sec)

Iran

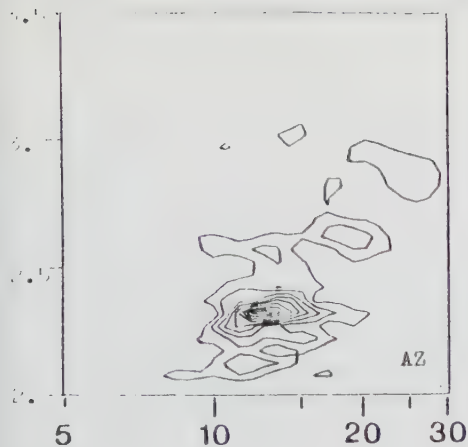
Während des Iran - Bebens war das GRF-C-Subarray gestört. Die herausragende Wellengruppe der A1-Z-Station bei der Zeitmarke 1600 läßt sich zwar über das ganze Array hin beobachten, zeigt aber im B-Subarray deutlich Zerfallerscheinungen. In den H-Komponenten sind die Frequenzen, die zu diesem Wellenpaket gehören bereits wesentlich früher zu beobachten. Weder aus den Gabor-Matrizen der Z-Komponenten noch aus denen der H-Komponenten ist eine verlässliche Gruppengeschwindigkeits - Dispersion herauszulesen. In den PDMS der H-Komponenten ist eine überwiegend lineare Polarisation zu beobachten, die wenige Grad von der N-S Richtung abweicht. Wegen des geographischen Azimuts von ca. 102 grd E war zu vermuten, daß es sich um Love-Wellenanteile handelt. Versuchsweise wurden die E-W Komponenten als R-Komponenten verarbeitet. Aufgrund der chaotischen Polarisations- und Dispersions-Verhältnisse in den PDMS wurde kein Versuch unternommen, Elliptizitäten abzulesen, oder eine fiktive Dispersionskurve zu invertieren. Die (HR-) wKA erbringt im Vergleich zu den bisherigen Analysen eine sehr geringe Auflösung. Die Azimute variieren in einem großen Bereich ; in allen Fällen scheint ein Wellenanteil aus nördlicher Richtung zu kommen. Im Gegensatz zu dem seltsamen Verhalten der Oberflächenwellen ergibt sich bei der wKA des P-Einsatzes ein scharfes Maximum mit einem Azimut von ca. 113 grd E.



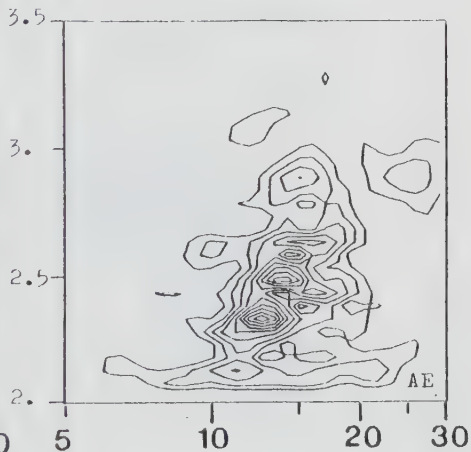
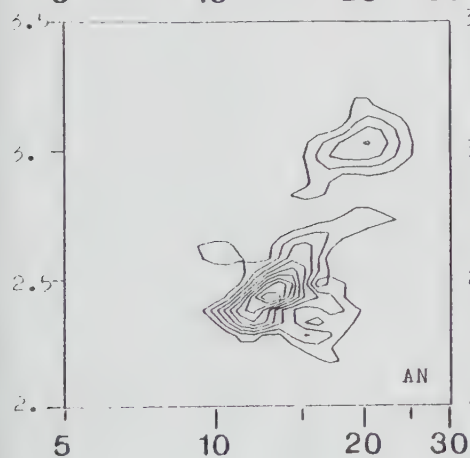
Z-, N-, und E-Komponente der Station A1

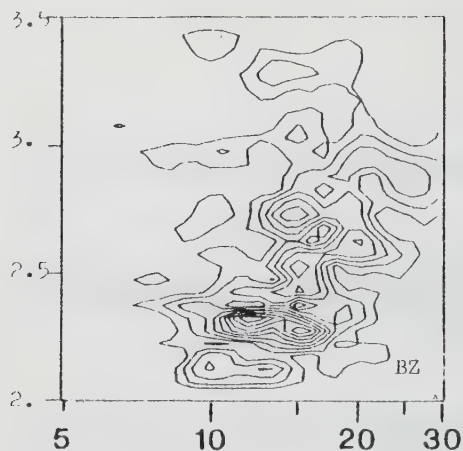


Vertikal-Komponenten der Stationen A1-C4

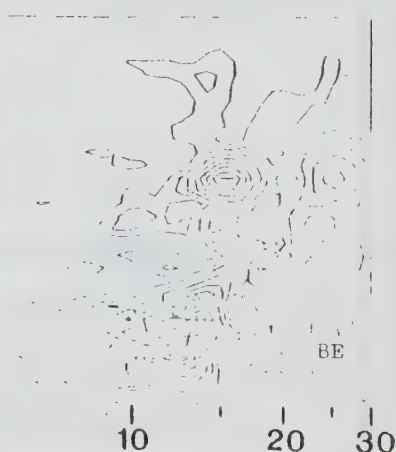
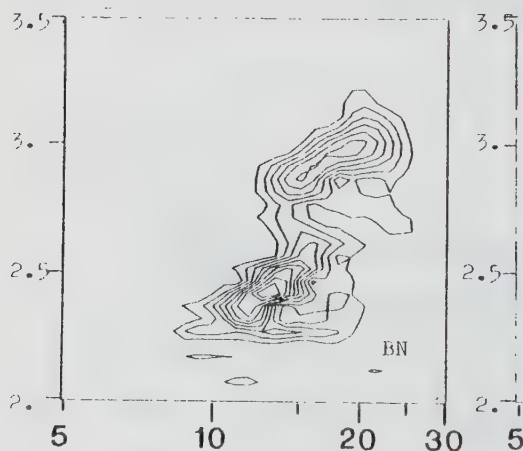


Gabor - Matrizen
der Station A1
horizontal : Periode (sec)
vertikal : Gruppengesch.
(km/sec)





Gabor - Matritzen
der Station B1
horizontal : Periode (sec)
vertikal : Gruppengesch.
(km/sec)



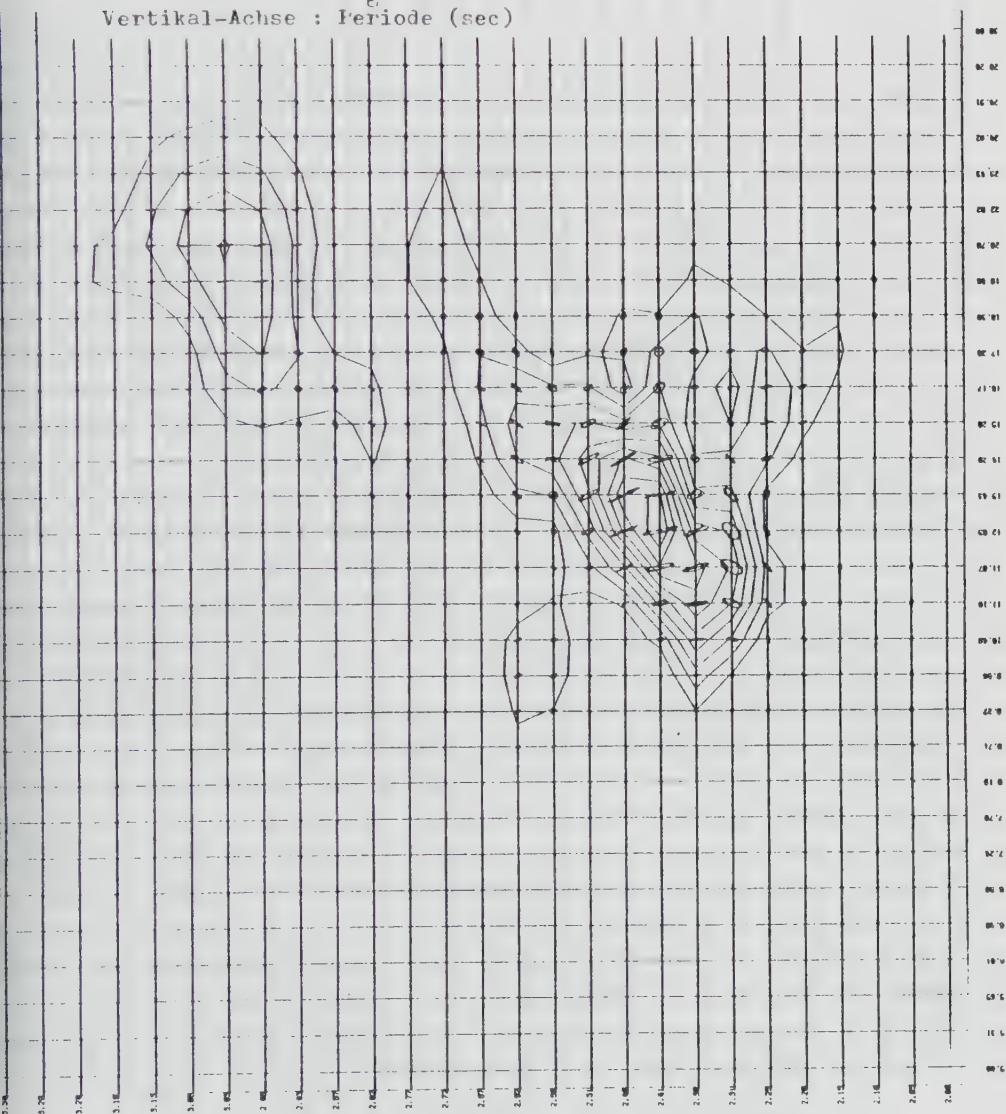
Polarisations-Dispersions-Matrix der Horizontal-Komponenten
der Station A1

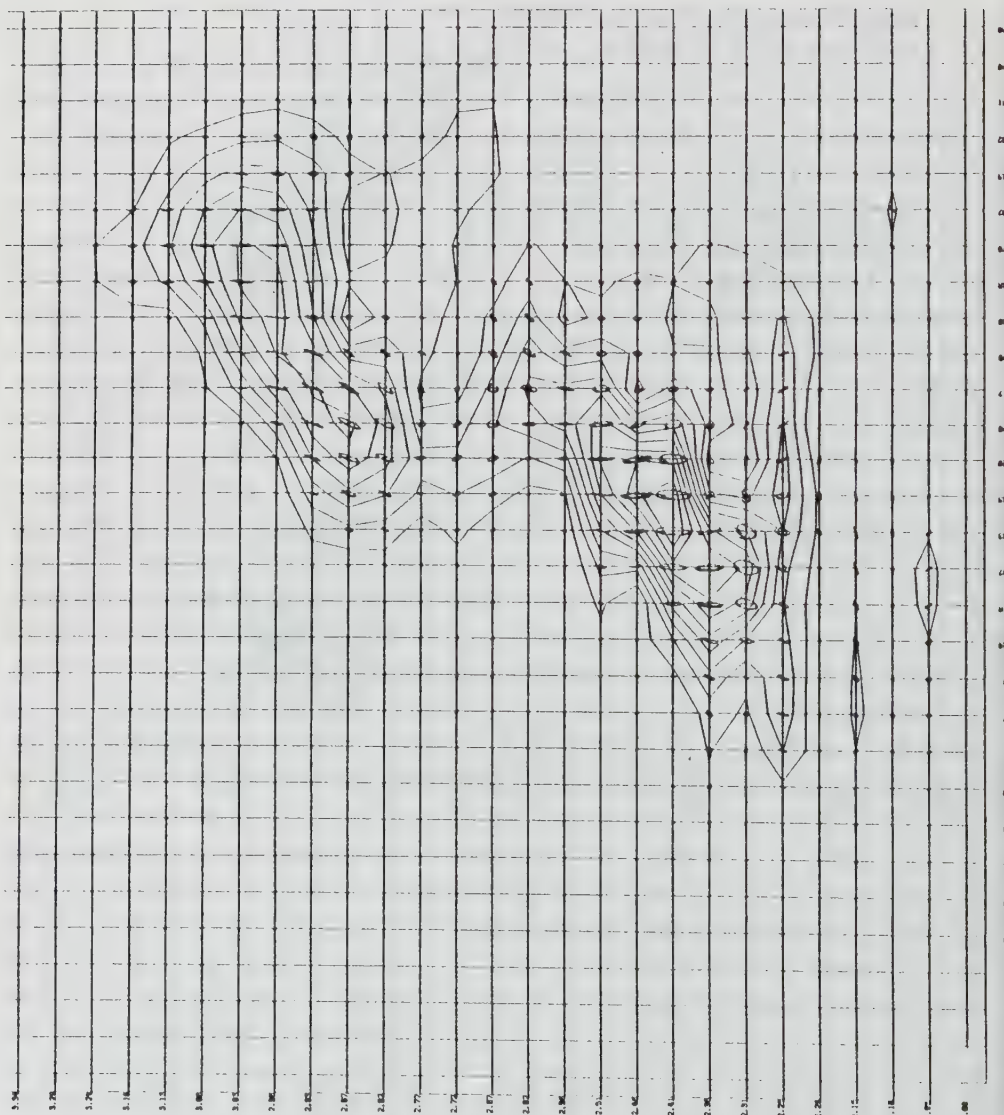
Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_E (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)





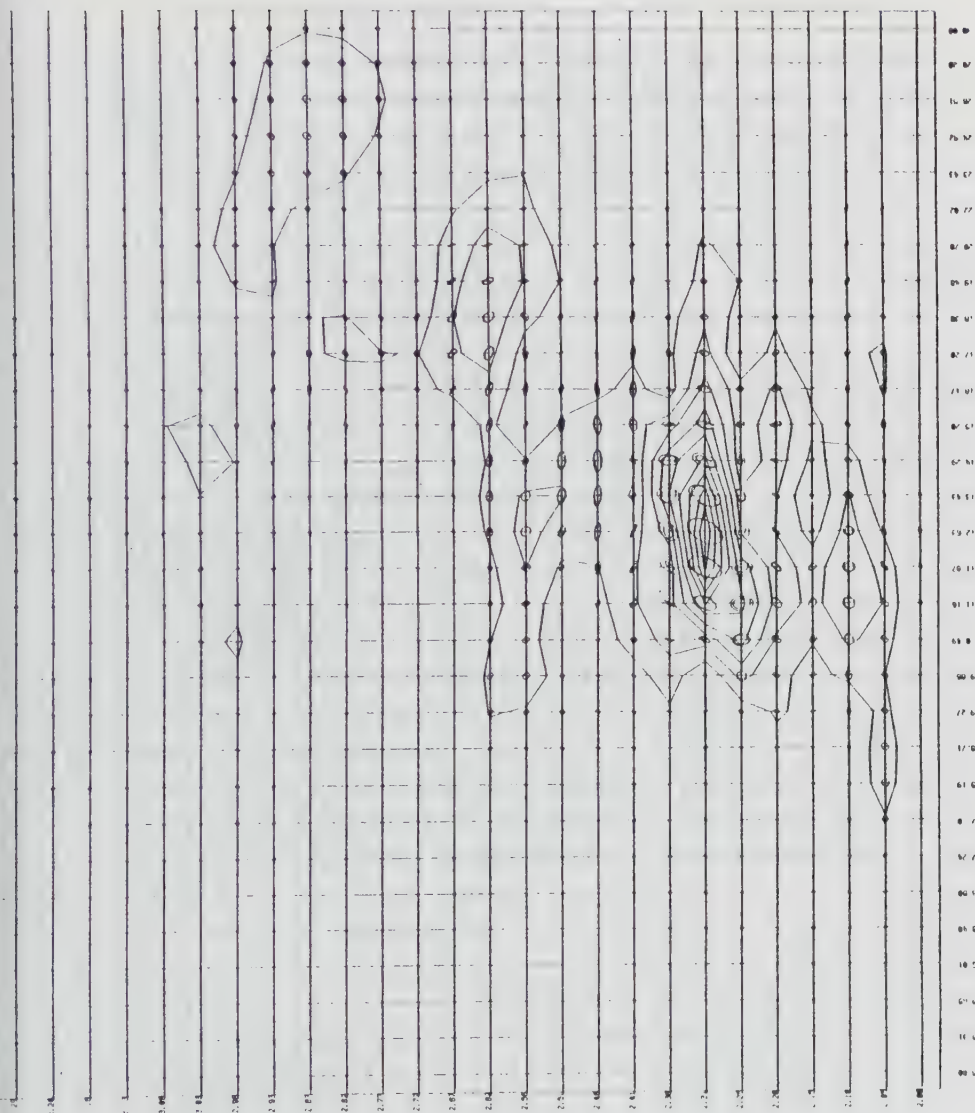
Polarisations-Dispersions-Matrix der Horizontal-Komponenten
der Station B1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

- 122 - Vertikal-Achse : Periode (sec)



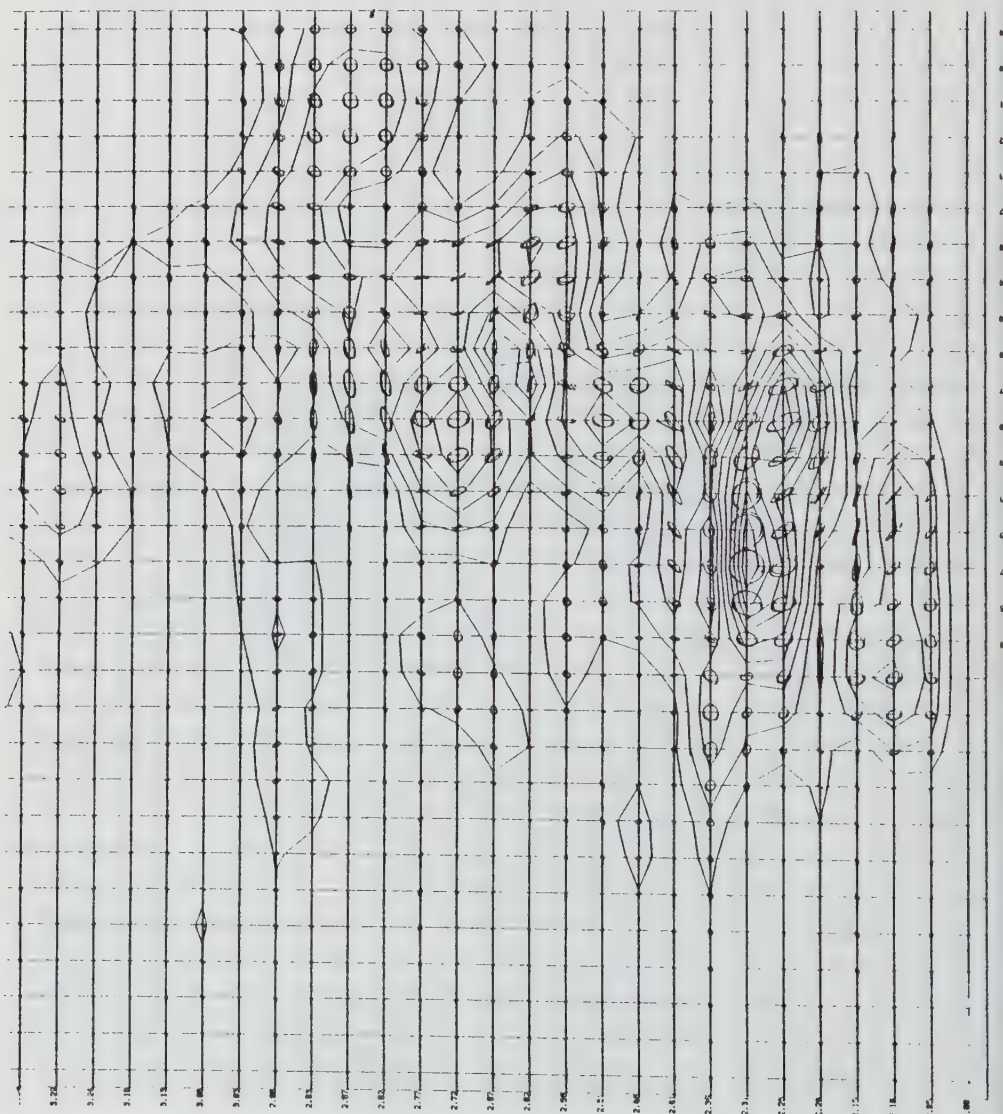
Polarisations-Dispersions-Matrix der Z- und E-Komponente
der Station A1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)



Polarisations-Dispersions-Matrix der Z- und E-Komponente
der Station B1

Orientierung der Hodographen :

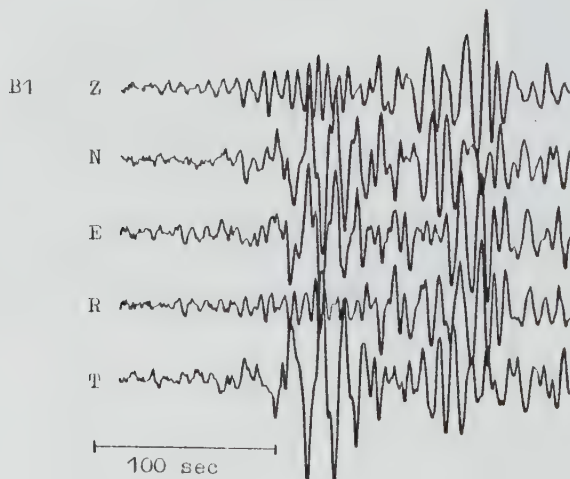
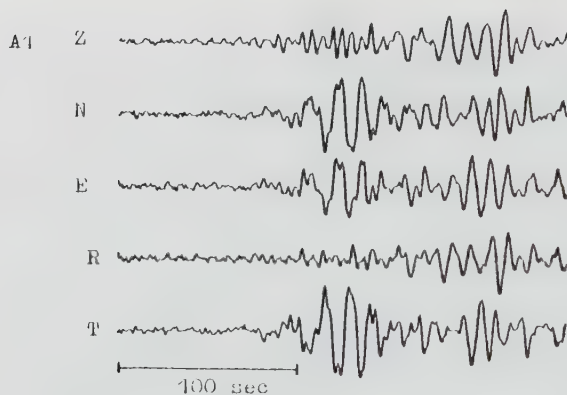


Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

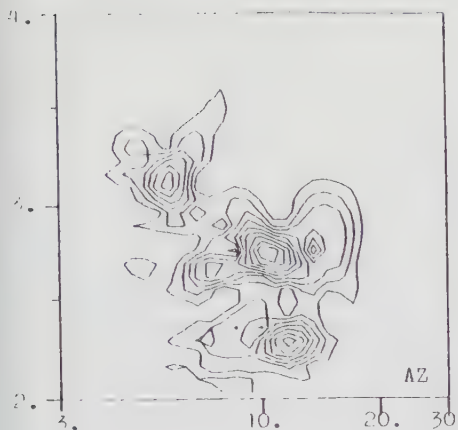
Vertikal-Achse : Periode (sec)

Ägäis

In den 3K-Registrierungen des Bebens sieht man in den Z-Komponenten einen schwach dispergierten Wellenzug mit ca. 6 sec Periode, dem ein stärker dispergierter Wellenzug mit längeren Perioden folgt. Im Bereich des kurzperiodischen Wellenzugs zeigen die H-Komponenten ein längerperiodisches Wellenpaket (ca. 14 sec), das vermutlich einer Love-Welle zugeordnet werden muß, da das Paket in den Z-Komponenten praktisch fehlt. Die PDMs der H-Komponenten bestätigen die Vermutung. Die dem längerperiodischen Wellenpaket der H-Komponenten zugeordnete Polarisation ist nahezu linear mit einem Azimut von ca. 32 grd E bei der Station A1 und ca. 35 grd E bei B1. Im Bereich des Amplitudenmaximums aller drei Komponenten bei der Geschwindigkeit 2.7 km/sec ist keine einheitliche Polarisation zu erkennen, vermutlich überlagert sich hier ein Teil der L0-Coda mit der R0-Airy-Phase. Der kurzperiodische Wellenzug weist bei der Station A1 eine transversale Polarisation auf, bei der Station B1 erkennt man durch die Ellipsenöffnung die Überlagerung eines weiteren Wellenanteils. Die Drehung der H-Komponenten um das geographische Azimut von 129 grd bringt eine sehr gute Trennung des Love-Anteils, ohne daß die Amplituden der T-Komponente im Bereich der vermuteten R0-Phase deutlich kleiner als in der R-Komponente sind. In den PDMs der R- und Z-Komponenten erscheint die R0-Phase nur sehr schwach hin zu längeren Perioden dispergiert. Die Ellipsen weisen insbesondere bei Station A1 z.T. recht große Neigungswinkel auf. Auf eine Auswertung der Elliptizität wurde daher und auch wegen des Amplitudenminimums bei der Periode 13.6 sec verzichtet. Der kurzperiodische Wellenzug mit Geschwindigkeiten zwischen 2.8 und 3.8 km/sec ist in den PDMs eindeutig als höhere Rayleigh-Mode zu identifizieren. Die Ellipsen weisen auch hier z.T. große Neigungswinkel auf und sind im Vergleich zur R0-Mode wesentlich stärker elongiert. Die Modellrechnung passt alle Dispersionskurven hervorragend an und bestätigt das geringe Halbachsen-Verhältnis der R1-Mode. Gleichzeitig zeigt sie, daß die R1- und L1-Mode nur geringe Unterschiede in der Gruppengeschwindigkeits-Dispersion aufweisen.



Vertikal-, NS-, EW-, Radial- und Transversal-Komponente
der Station A1, B1



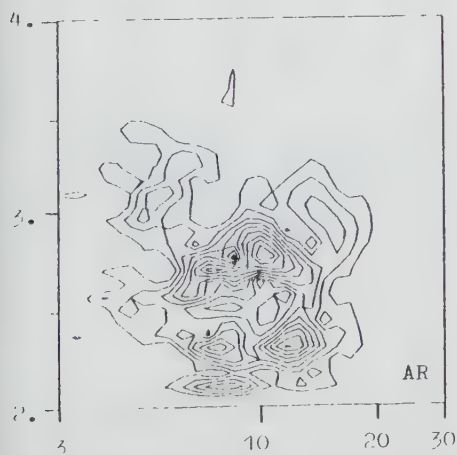
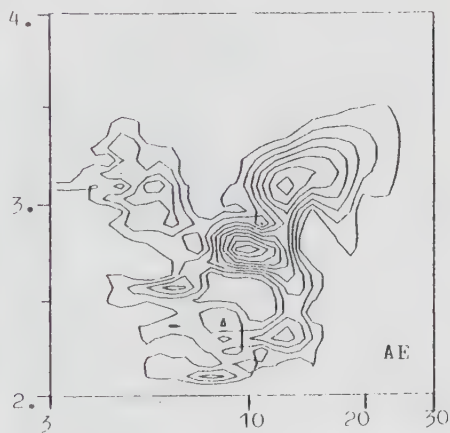
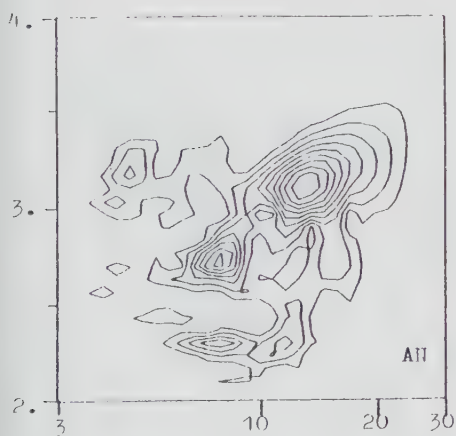
Gabor - Matrizen

der Station A1

horizontal : Periode (sec)

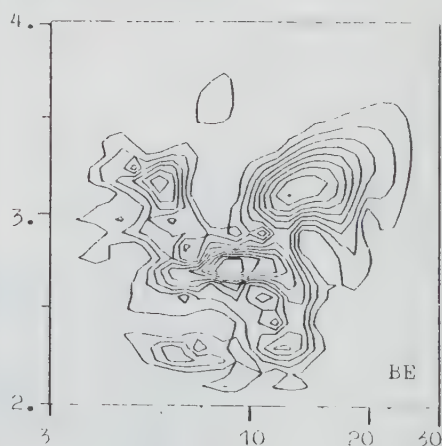
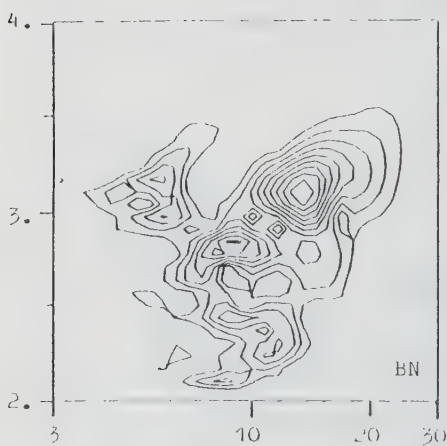
vertikal : Gruppengesch.

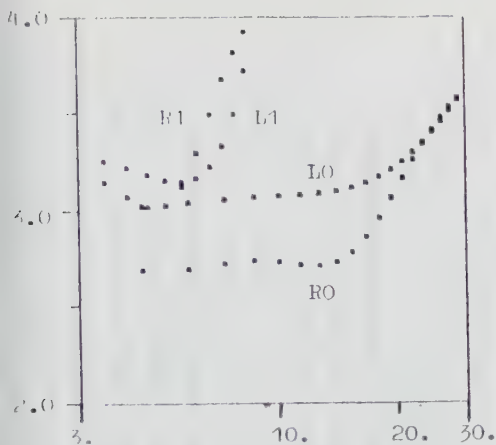
(km/sec)



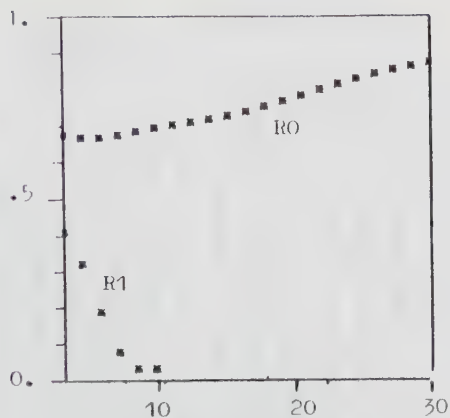


Gabor - Matrizen
der Station B1
horizontal : Periode (sec)
vertikal : Gruppengesch.
(km/sec)

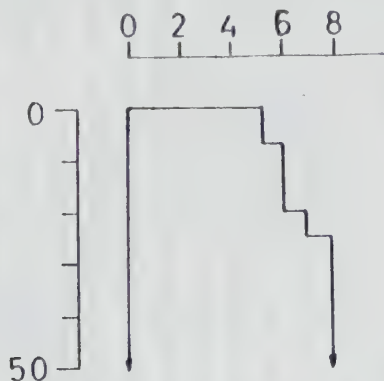




Theoretische Gruppengeschwindigkeits-Dispersion für das Ägäis-Beben.
horizontal: Periode in sec
vertikal: Gruppengesch. in km/sec



Theoretische Elliptizitäten für das Ägäis-Beben.
horizontal: Periode in sec,
vertikal: Elliptizität



Geschwindigkeits-Tiefen-Modell für das Ägäis-Beben.
horizontal: v_p (km/sec); $v_s = 1/\sqrt{3} v_p$
vertikal: Tiefe in km

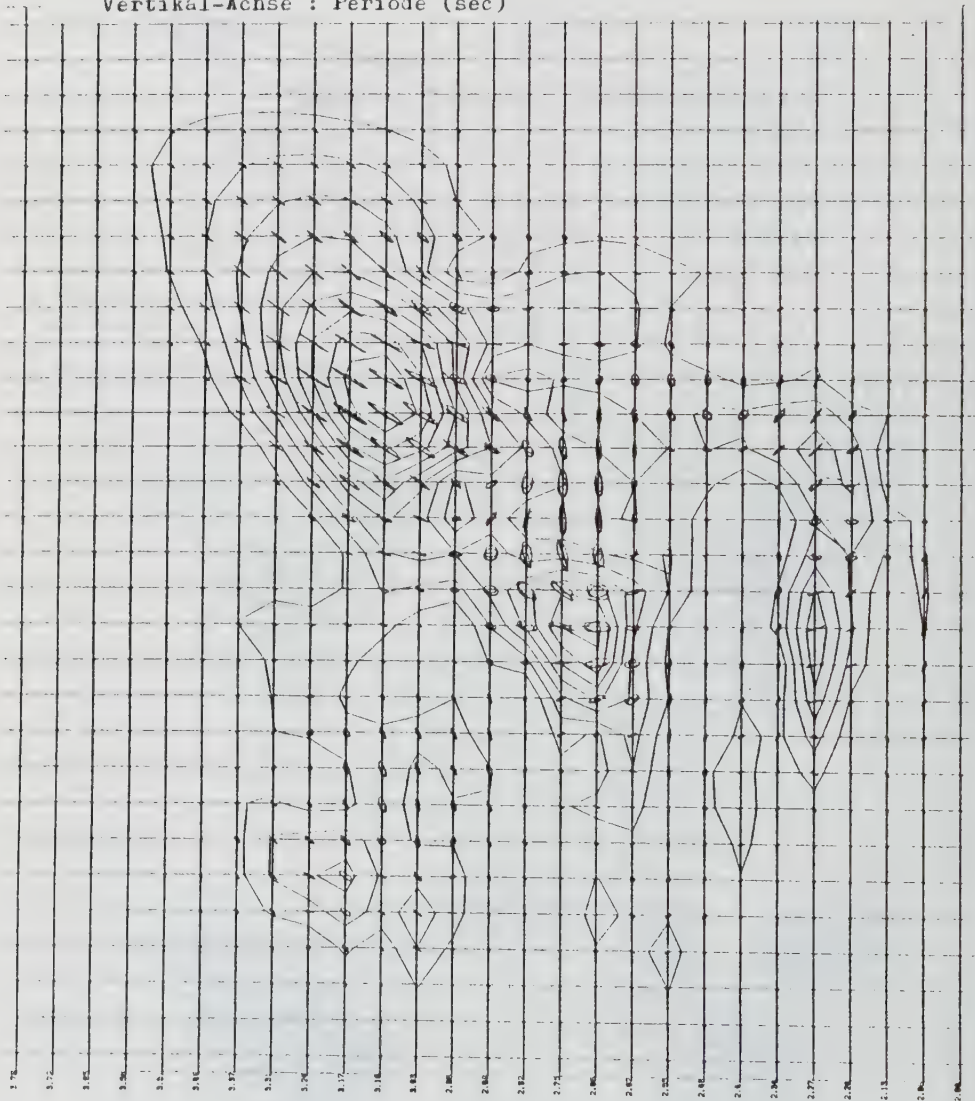
Polarisations-Dispersions-Matrix der Horizontal-Komponenten
der Station A1

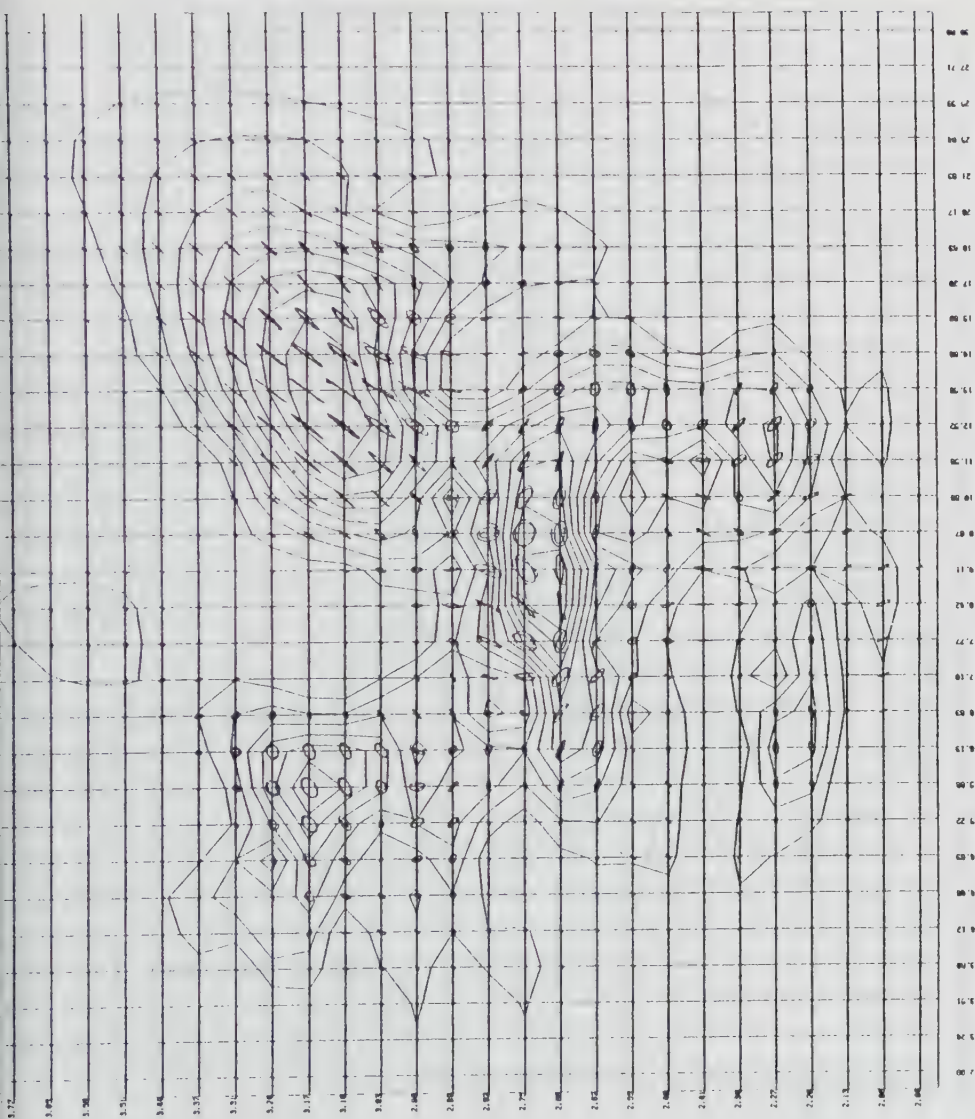
Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)





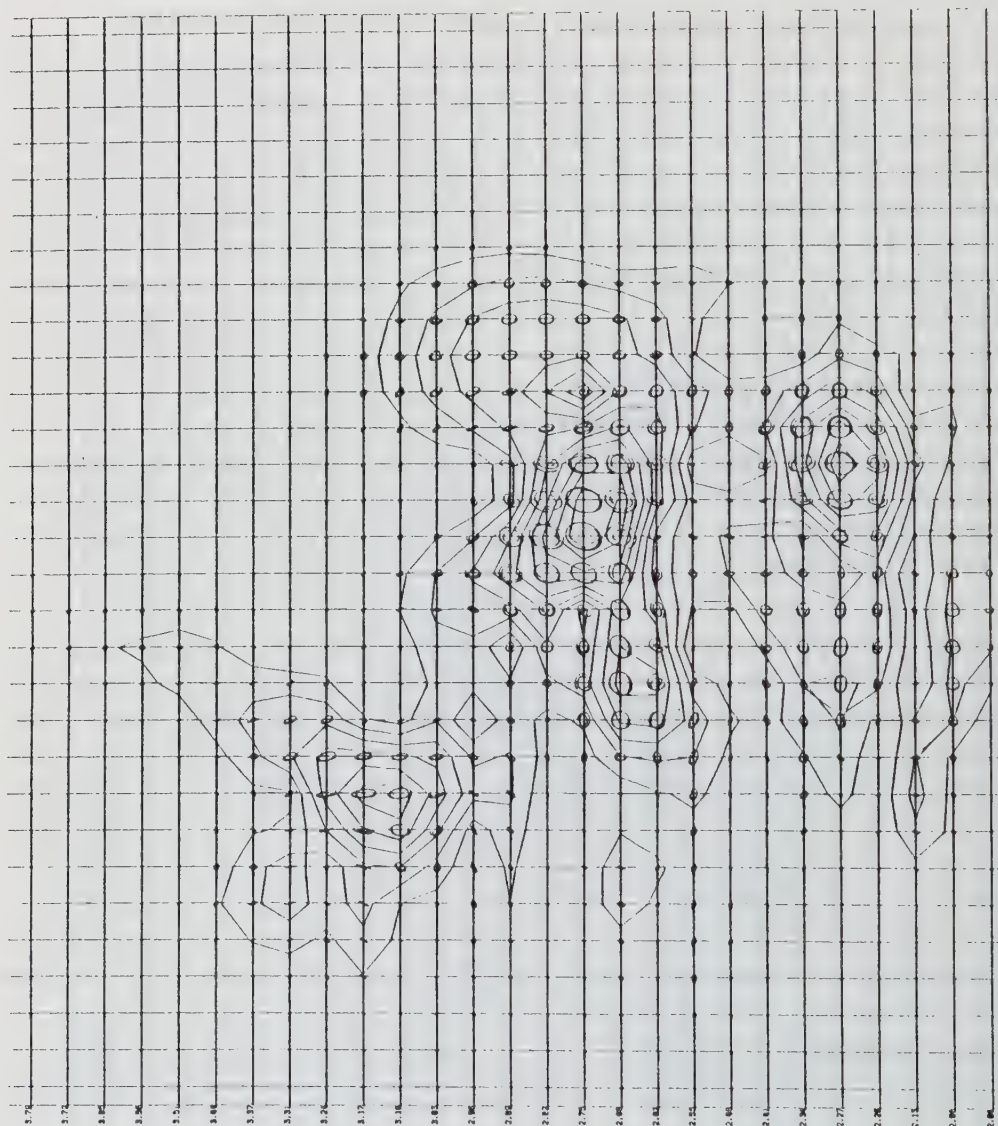
Polarisations-Dispersions-Matrix der Horizontal-Komponenten
der Station B1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)



Polarisations-Dispersions-Matrix der Z- und R-Komponente
der Station A1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_E (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)

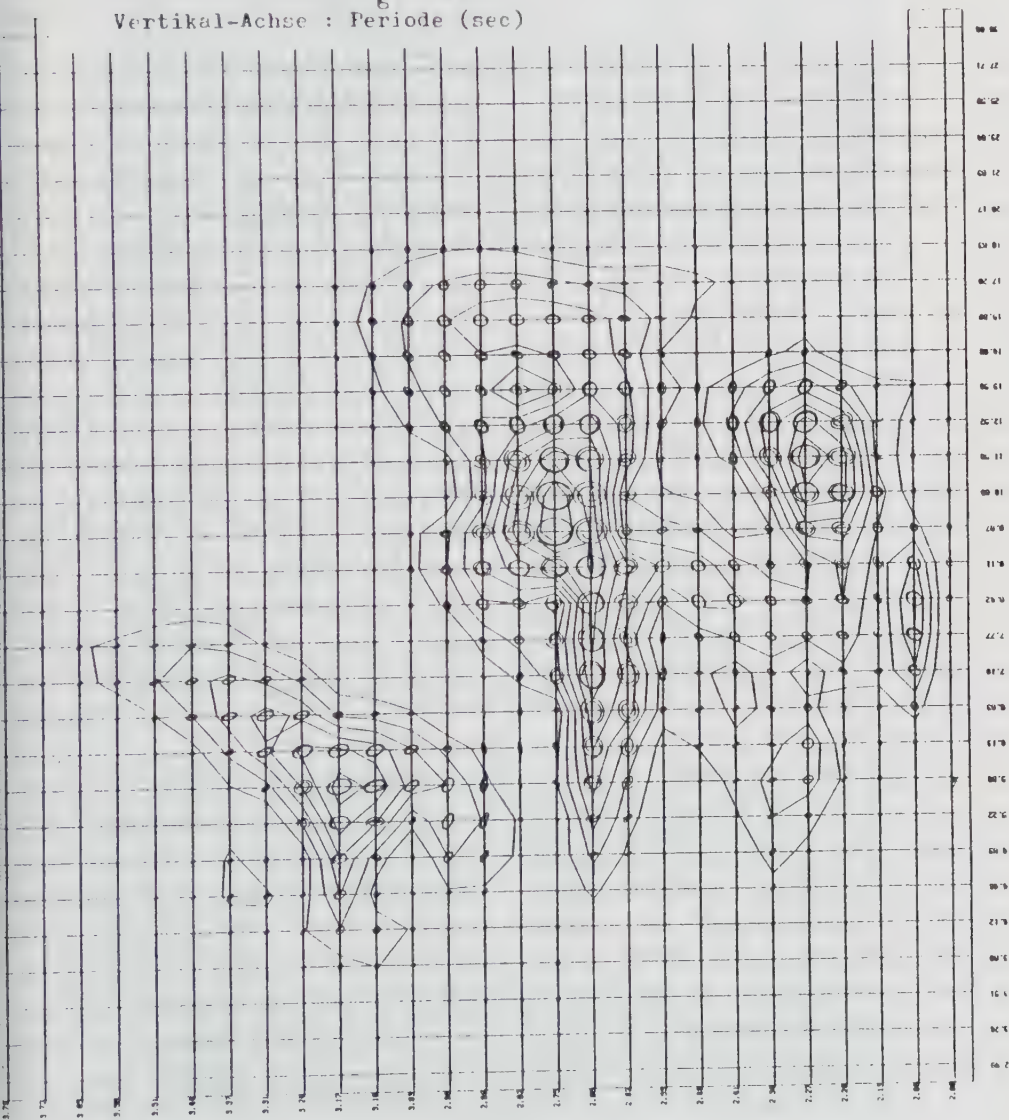
Polarisations-Dispersions-Matrix der Z- und R-Komponente
der Station B1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

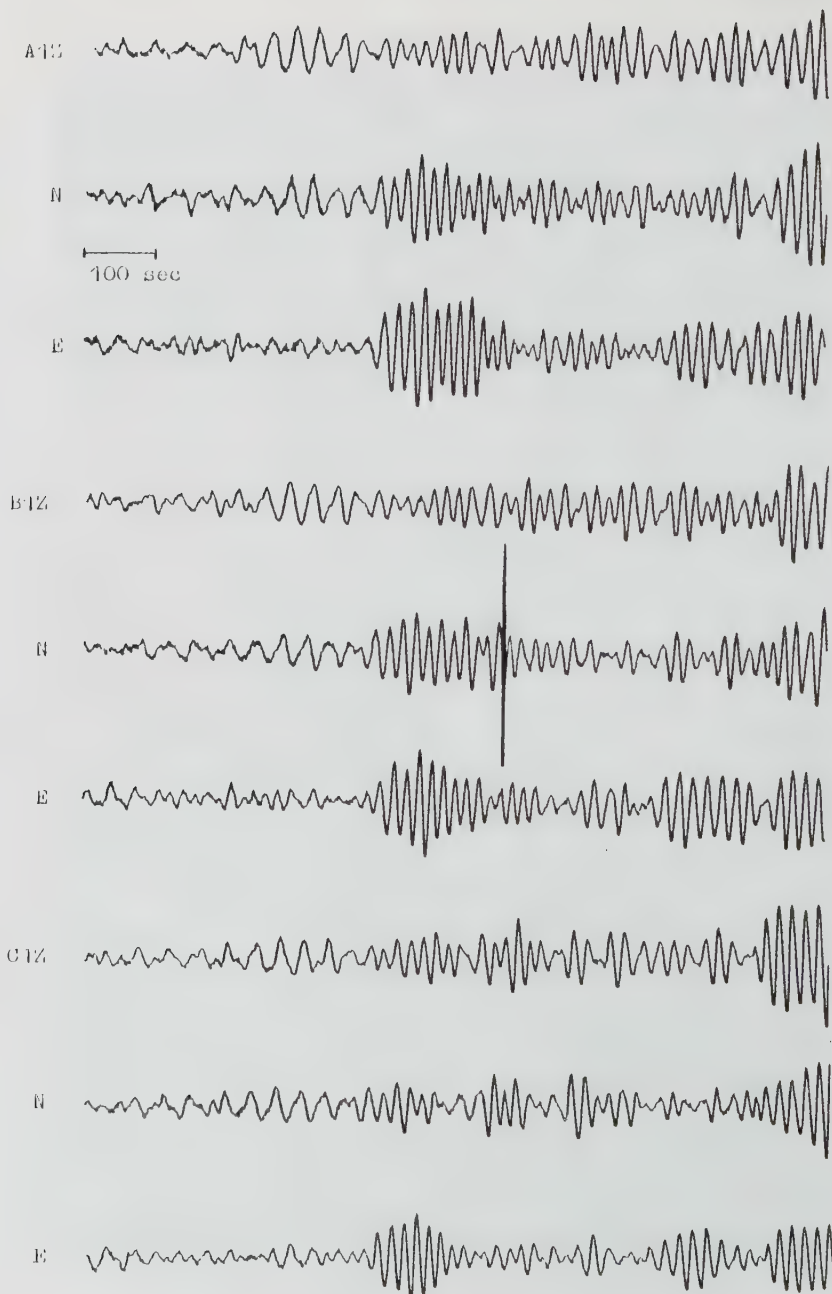
Vertikal-Achse : Periode (sec)



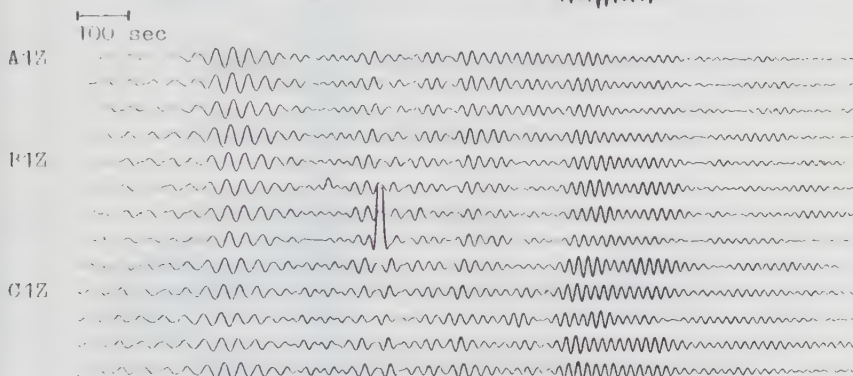
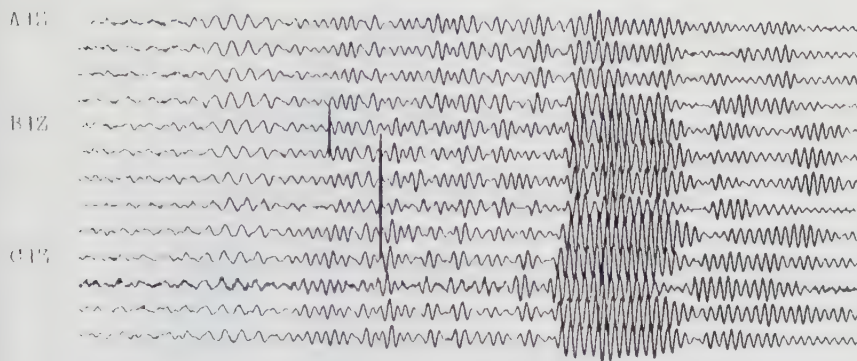
Südl. Afrika

In den Z- und N-Komponenten der Bebenregistrierungen kann man zu Beginn des Ausschnitts einen deutlich dispergierten Wellenzug erkennen, der im folgenden zahlreiche Phasensprünge aufweist. In den H-Komponenten ist in der Mitte des Intervalls ein schwach dispergierter Wellenzug mit großen Amplituden zu erkennen, dessen Gestalt sich zwischen den drei Stationen deutlich unterscheidet. Einer unmittelbaren Interpretation als Love-Welle widerspricht der gleichzeitig in den Z-Komponenten zu beobachtende gleiche Frequenzgehalt. In den Gabor-Matrizen erscheint der langperiodische Wellenzug im ersten Drittel des Zeitfensters klar abgesetzt von dem restlichen Wellenzug, der lediglich in der ClZ-Komponente den Verlauf des R0-Dispersionsasts erkennen läßt. In den PDMs der H-Komponenten zeigt der langperiodische Wellenzug in guter Näherung lineare Polarisation, deren Richtung mit dem geographischen Azimut übereinstimmt. Recht einheitlich ist auch die Polarisation des Wellenpakets, das in der Mitte des Zeitfensters auftaucht. Die Schwingungsellipsen sind leicht geöffnet und weisen in eine Richtung von ca. 35 grd W, womit nach wie vor unklar ist, ob es sich um einen Rayleigh- oder Love-Anteil oder eine Mischung beider handelt. Bei der BI-Station sind die Folgen eines Übertragungsfehlers (Spike) in der N-S-Komponente bei der Geschwindigkeit 3.24 km/sec zu sehen. In der Montage der Z-Komponenten ist zu Beginn des Zeitfensters wieder der langperiodische Wellenzug zu erkennen, dem sich der bei den H-Komponenten prägnantere höherfrequente Wellenzug anschließt; danach wird das Wellenfeld unübersichtlich, und auch in der 10-sec-TP-gefilterten Montage lassen sich Wellengruppen, wenn überhaupt, nur mit Mühe über das Array verfolgen. Schließlich folgt ein quasi-monofrequenter, langgestreckter Wellenzug, dessen Amplituden von der AlZ- zur C4Z-Station hin zunehmen. Die anschließende ebenfalls quasi-monofrequente Coda erscheint völlig inkohärent. Abb. 5.438 zeigt nochmals deutlich, wie plötzlich der quasi-monofrequente Wellenzug, in dem die R0-Airy-Phase vermutet werden kann, das Wellenfeld bestimmt. Die wKA des ersten langperiodischen Amplitudenmaximums zeigt die Richtung der Wellenausbreitung bei einer Periode von 23 sec aus 145 grd W, eine langsame Drehung mit zunehmender Periode nach S und bei längeren Perioden ein Azimut, das dem geographischen entspricht. Der anschließende höherfrequente Wellenzug weist im Periodenbereich von 14-19 sec ein Azimut von ca. 22 grd W auf, bei Perioden > 19 sec ist "Multipathing" zu beobachten. Dies gilt auch für die folgenden Wellenzüge bis zur Airy-Phase, wobei Azimute aus W vorherrschen. Auch die Airy-Phase zeigt geringes "Multipathing" wobei die Richtung des Energiemaximums von 140 grd W bei 13 sec Periode über S bei 17.4 sec nach 140 grd E bei 21.5 sec dreht. Die Coda erscheint bei fast allen Perioden aus mehreren Wellenzügen aufgebaut, wobei azimutale Abweichungen von 50 grd nicht untypisch sind. Die Schwingungsellipsen in der Sagittalebene zeigen bei der

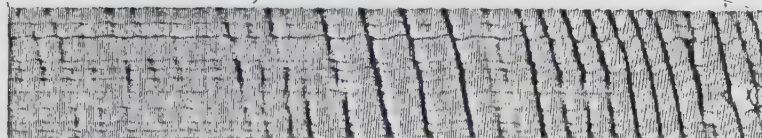
Station A1 im Gegensatz zu den anderen Stationen relativ große Neigungen im Bereich des ersten langperiodischen Amplitudenmaximums. Hin zu geringeren Geschwindigkeiten zeigt sich ein uneinheitliches Polarisationsverhalten, wie es aufgrund der Mehrfachausbreitung zu erwarten ist. Die Inversion des R0-Dispersionsasts gelingt leidlich gut, und das Modell erklärt auch den kurzperiodischen Wellenanteil der H-Komponenten (in der Mitte des Zeitintervalls) als L0-Mode. Ungeklärt bleibt die Polarisationsrichtung dieses Wellenzugs in der Horizontalen und sein Erscheinen in den Z-Komponenten, wenn man nicht annimmt, daß es sich um eine Überlagerung der L0-Mode mit einer - etwa an der guineischen Küste - konvertierten Rayleigh-Mode handelt. Die gemessenen Elliptizitäten der B1- und C1-Station zeigen einen einheitlichen Verlauf, ohne sich besonders gut den theoretischen anzupassen.



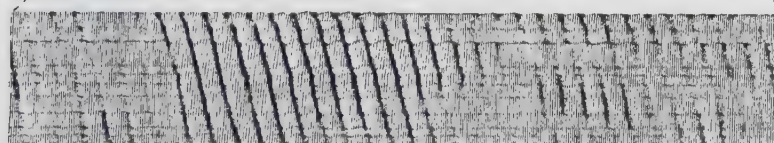
Vertikal-, NS-, EW- Komponenten
der Station A1, B1, C1



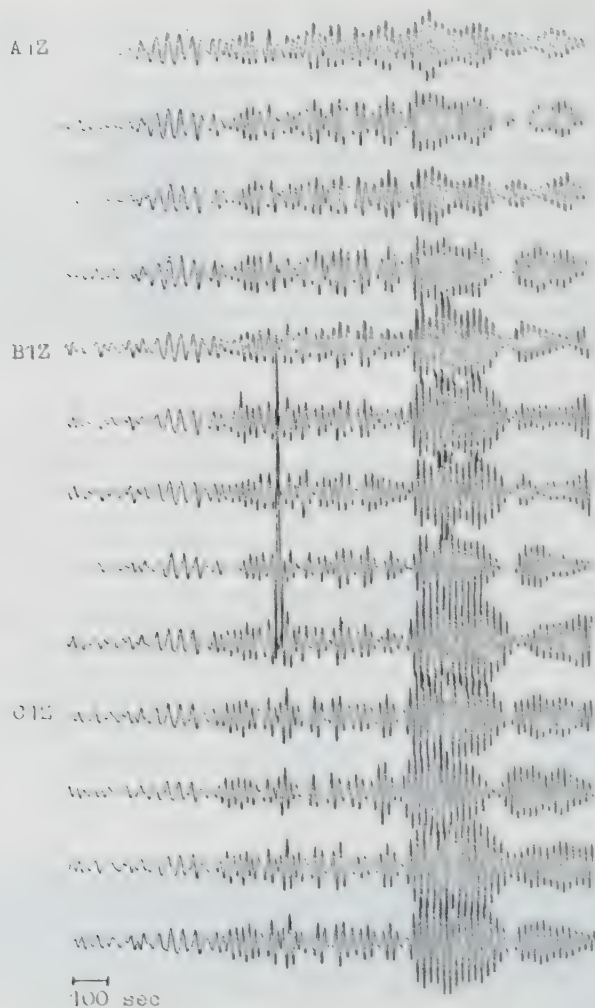
Vertikal-Komponenten der Stationen A1-C4,
10sec-TP-gefiltert (darunter)



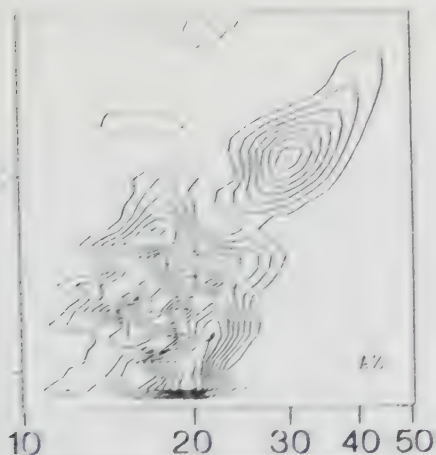
100 sec



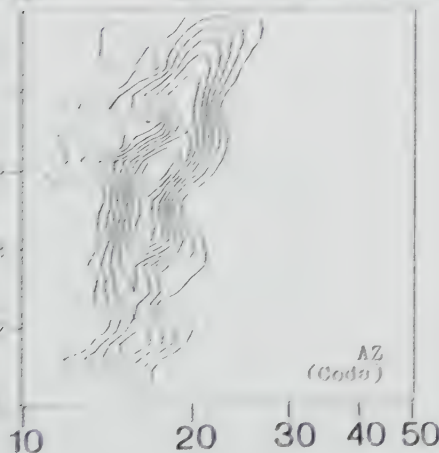
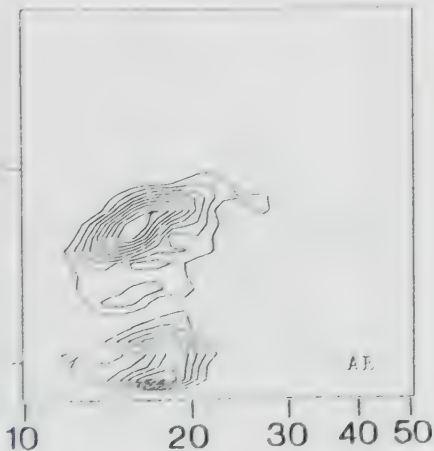
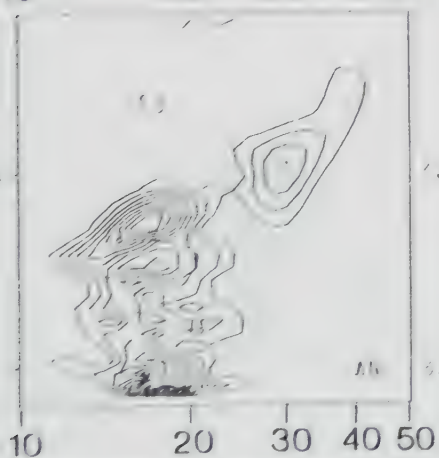
Montagen der Z-Komponenten; horizontal: Zeit, vertikal: Epi-
zentralentfernung. Horiz. Verbindungslinien: Amplituden an
einer Station, dto. vertikal: Ampl. zu einem Zeitpunkt.

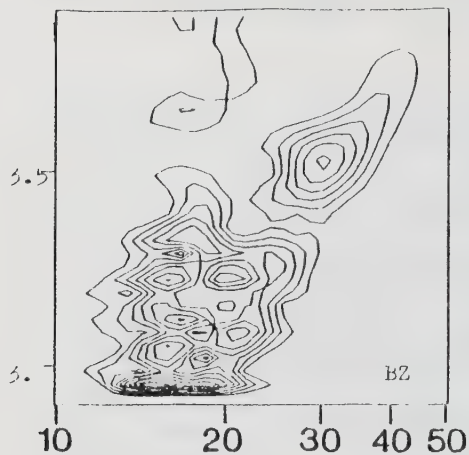


Vertikal-Komponenten der Stationen A1-C4

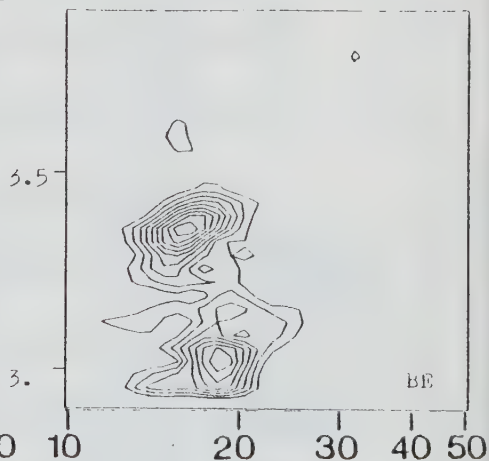
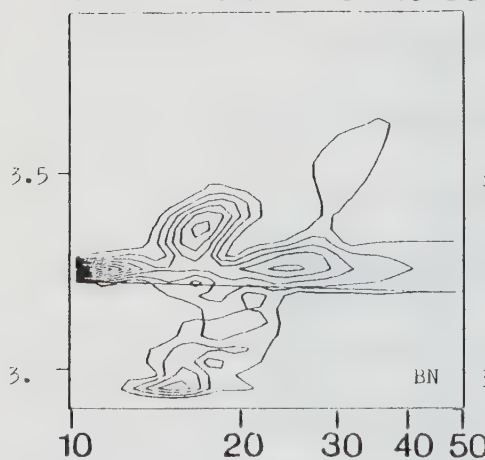


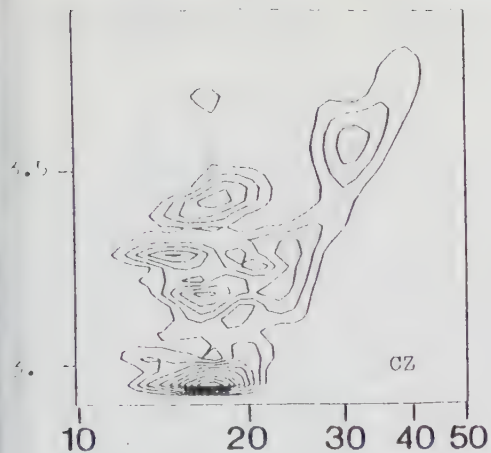
Gabor - Matritzen
der Station A1
horizontal : Periode (sec)
vertikal : Gruppengesch.
(km/sec)



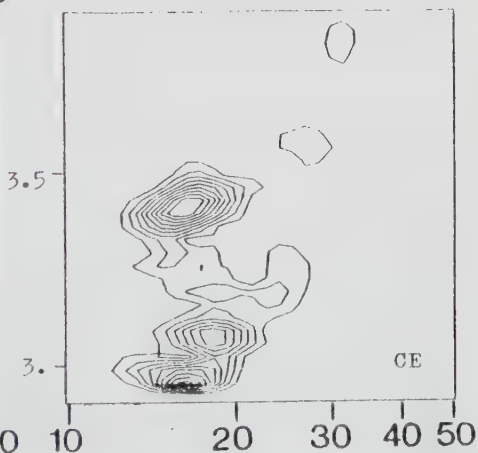
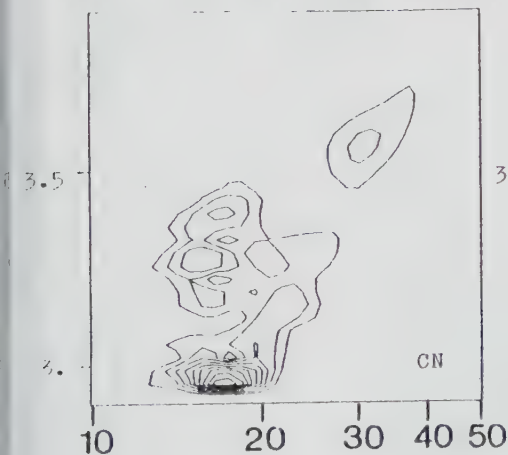


Gabor - Matritzen
der Station B1
horizontal : Periode (sec)
vertikal : Gruppengesch.
(km/sec)





Gabor -Matritzen
der Station C1
horizontal : Periode (sec)
vertikal : Gruppengesch.
(km/sec)



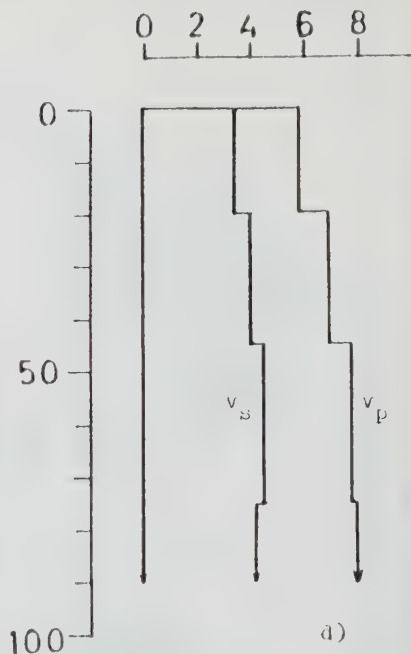
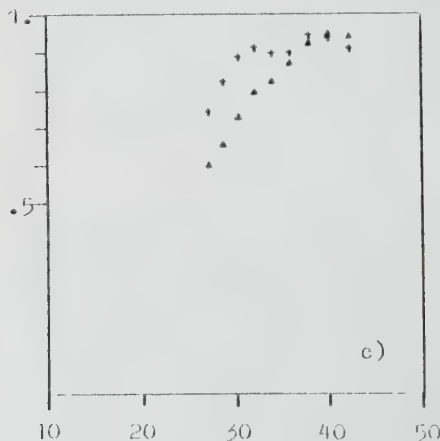
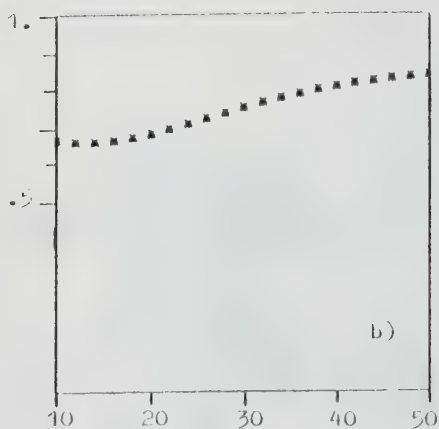
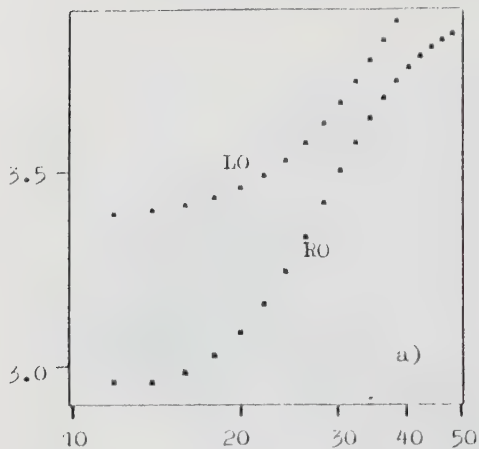


Abb. a) Theoretische Gruppengesch.
Dispersion
horizontal : Periode (sec)
vertikal : v_E (km/sec)

Abb. b) und c)
Theoretische und gemessene
Elliptizitäten in Abhängig-
keit von der Periode
 $\Delta \hat{= B1}$, $+$ $\hat{= C1}$

Abb. d) den theoretischen Kurven
zugrundeliegendes Geschwin-
digkeits-Tiefen-Modell.



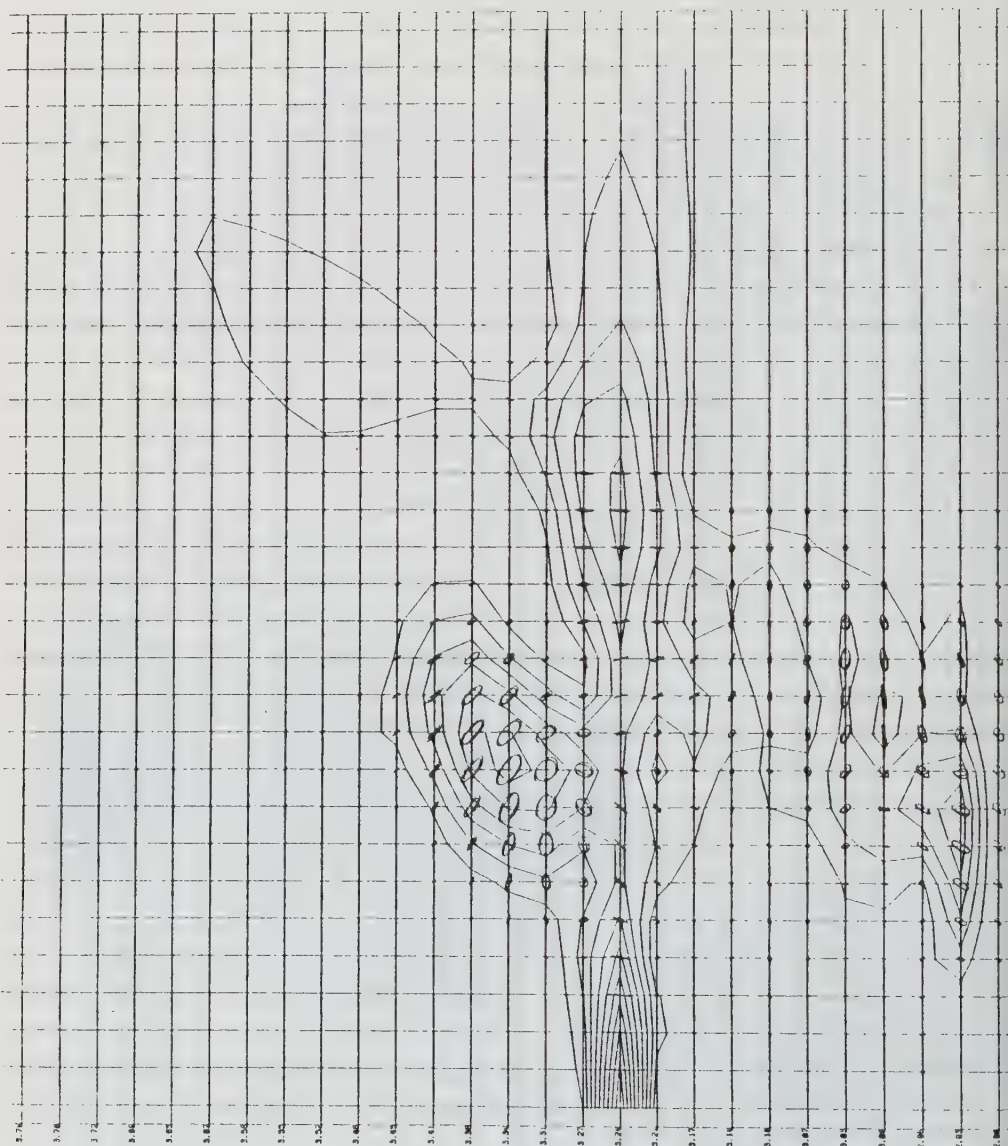
Polarisations-Dispersions-Matrix der Horizontal-Komponenten
der Station A1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_E (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)



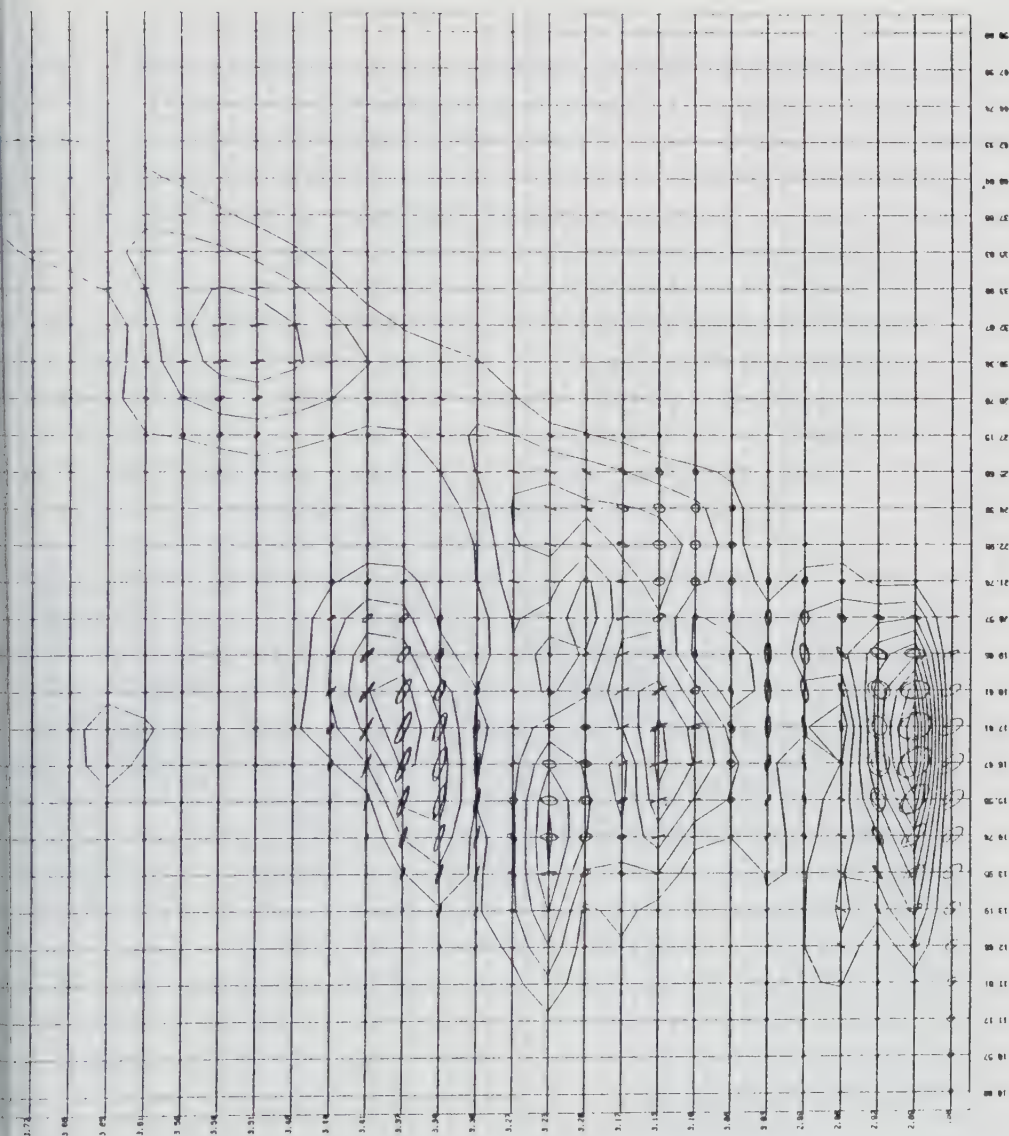
Polarisations-Dispersions-Matrix der Horizontal-Komponenten
der Station B1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)



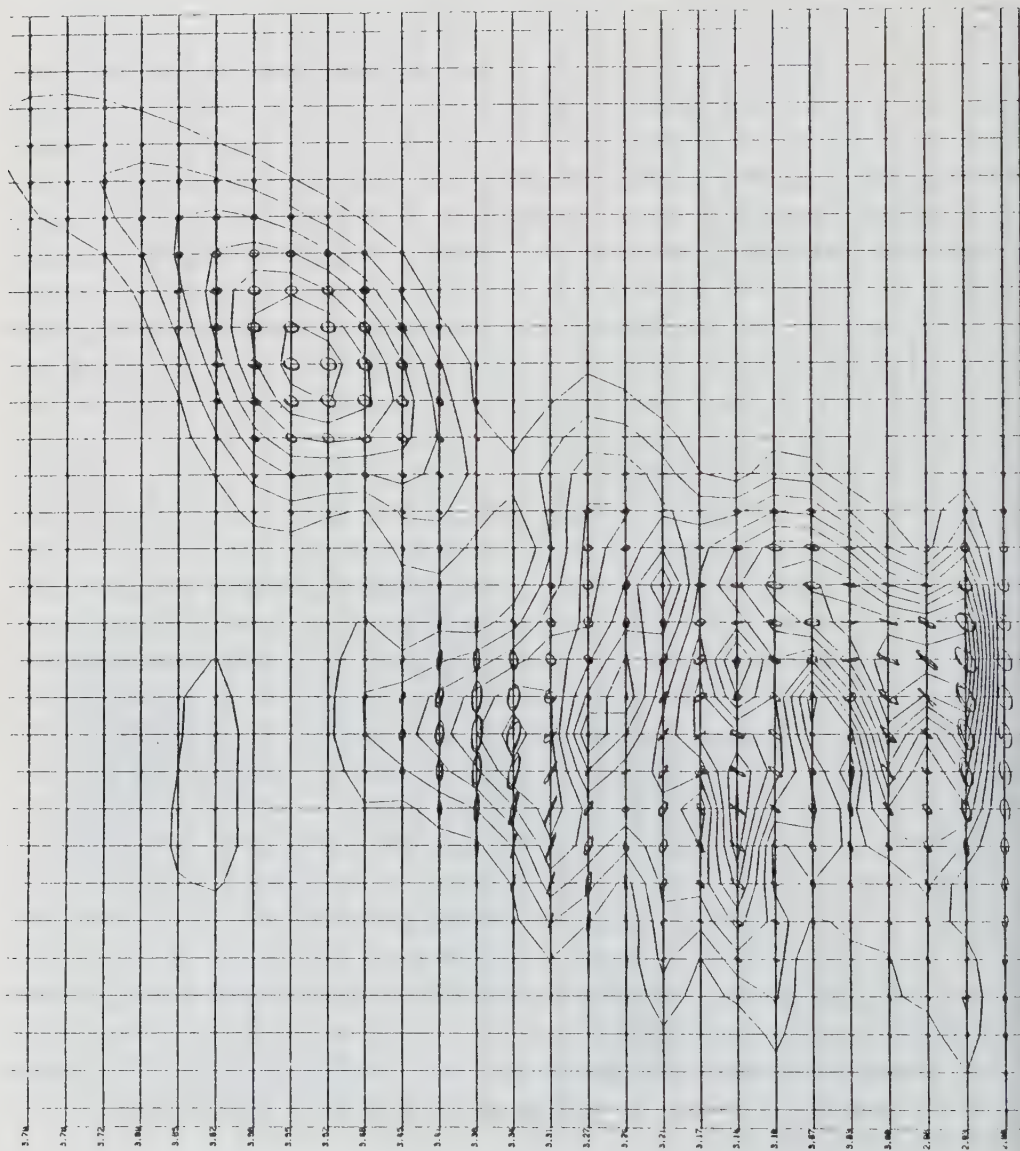
Polarisations-Dispersions-Matrix der Horizontal-Komponenten
der Station C1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_E (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)



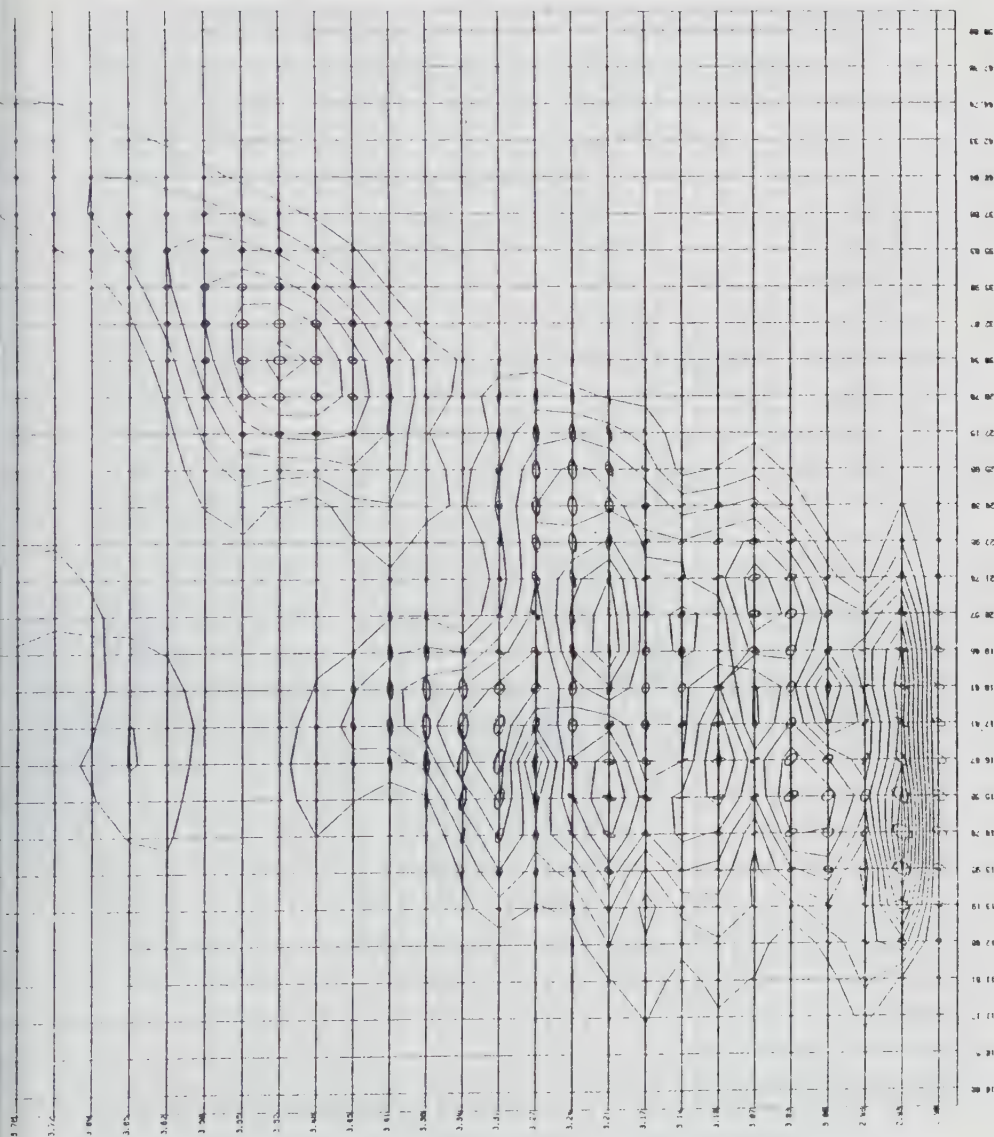
Polarisations-Dispersions-Matrix der Z- und R-Komponente
der Station A1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_E (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)



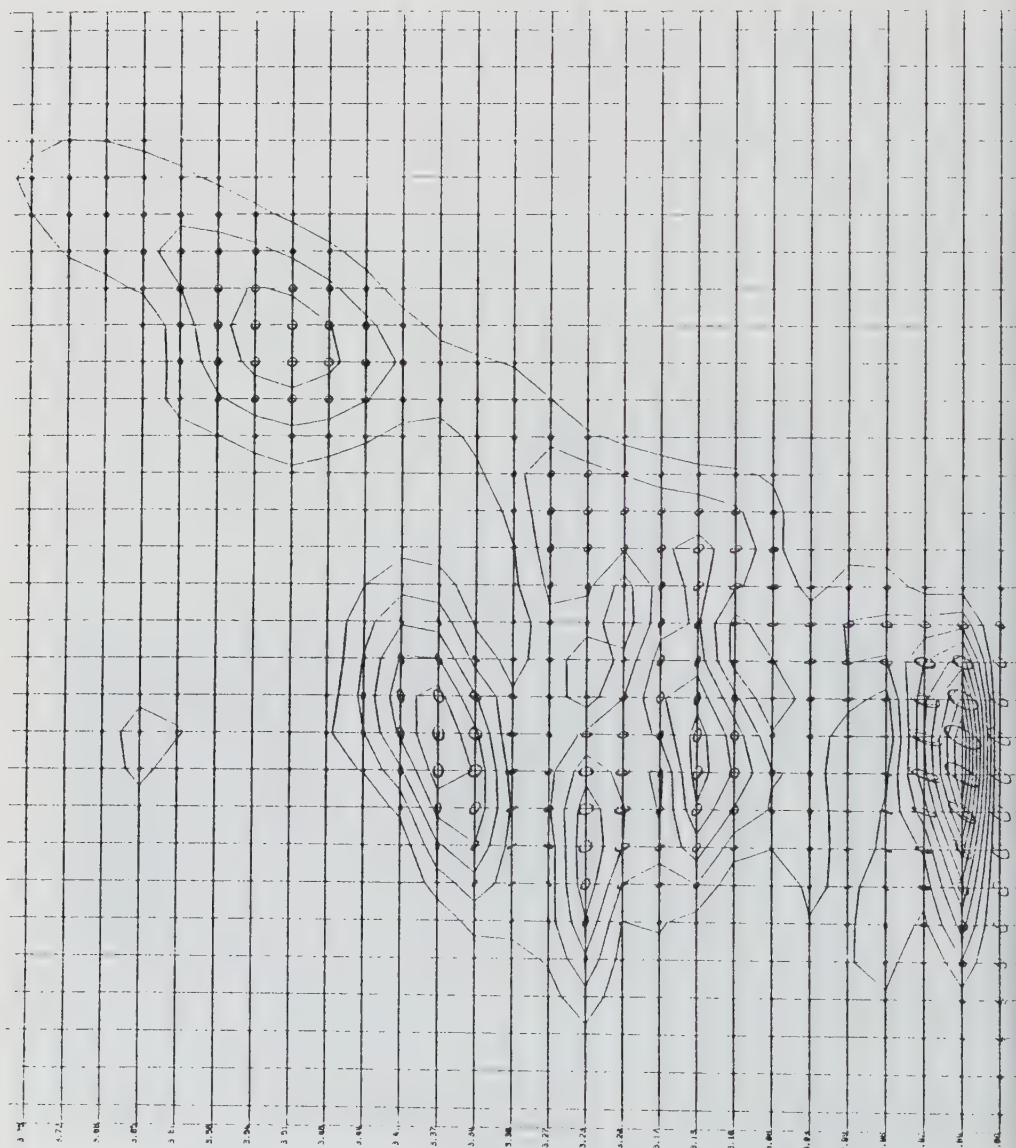
Polarisations-Dispersions-Matrix der Z- und R-Komponente
der Station B1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_E (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)



Polarisations-Dispersions-Matrix der Z- und R-Komponente
der Station C1

Orientierung der Hodographen :

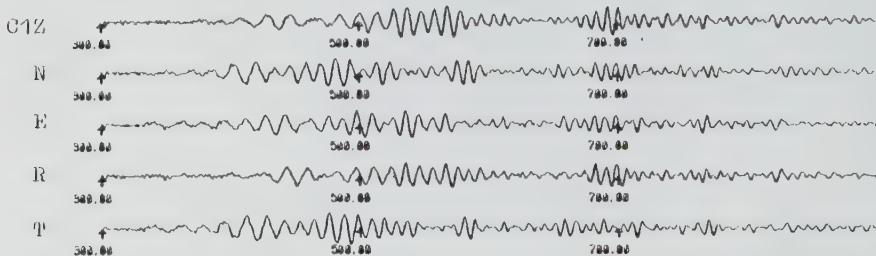
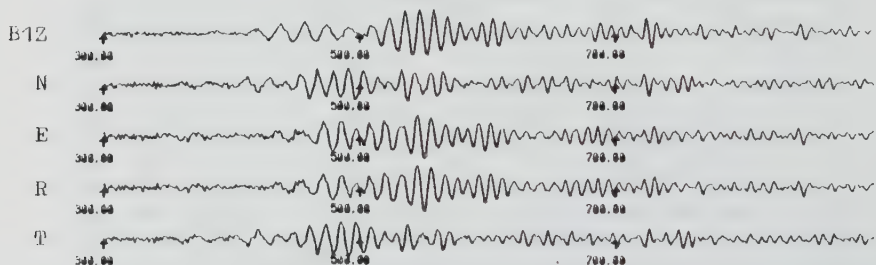
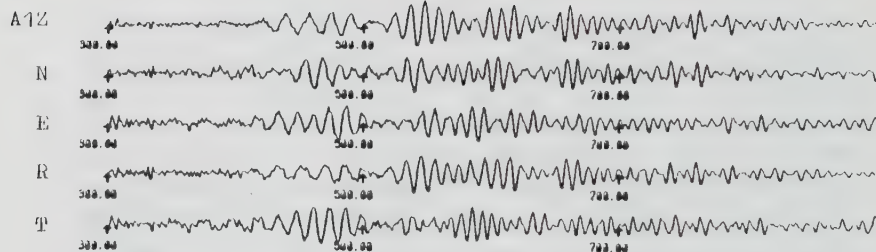


Horizontal-Achse: v_E (km/sec)

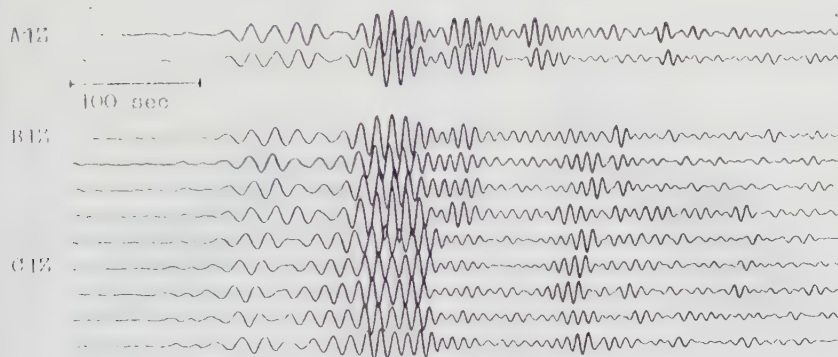
Vertikal-Achse : Periode (sec)

Algerien (1)

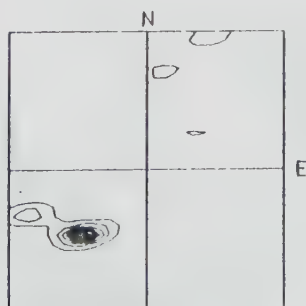
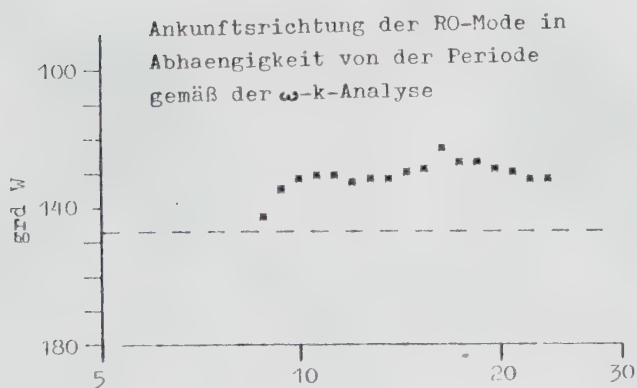
Die A1Z-Komponente zeigt eine langgezogene deutlich dispergierte Schwingung, die sehr regelmäßig durch Schwebungsminima unterbrochen wird. Dieses Schwebungsmuster ist an der C1-Station praktisch nicht mehr zu erkennen. Die H-Komponenten zeigen durch einen leicht von den Z-Komponenten unterschiedlichen Frequenzgehalt an, daß auch eine Love-Welle vorhanden ist. Die PDMS der H-Komponenten zeigen das für eine Überlagerung von RO- und LO-Mode typische Polarisationsmuster. Während im Bereich der niedrigsten Isolinie bei den höheren Geschwindigkeiten Love-Wellen-Polarisation vorherrscht, dominiert Rayleigh-Wellen-Polarisation bei den niedrigeren Geschwindigkeiten, wobei die Überlagerung bei größeren Amplituden eine uneinheitliche Polarisation bewirkt. Die horizontale Teilchenbewegung der Love-Welle ist nicht ganz einheitlich, beträgt jedoch im Mittel ca. 45 grd W. Die Polarisationsrichtung der Rayleigh-Welle streut stärker, wohl wegen der noch vorhandenen Kontamination durch die LO-Mode. In der Montage der Z-Komponenten läßt sich deutlich die Veränderung des Interferenzmusters mitverfolgen. Besonders deutlich ist der Zerfall des dritten Wellenpakets von der A1Z- zur C4Z-Station. Die wkA zeigt für diesen Zeitausschnitt (580-650 s) klar mindestens zwei Wellenanteile, bei denen der energiereichere aus 135 grd W, der energieärmere aus ca. 110 grd W kommt. Beide Winkel weichen deutlich vom geographischen Azimut von ca. 147 grd W ab. Ähnliches zeigt die wkA entlang der Dispersionskurve : bei Perioden < 9 sec werden mehrere Wellenanteile diagnostiziert; das Azimut schwankt periodenabhängig gering um 130 grd W. Die Schwingungsellipsen in der Sagittalebene zeigen unterschiedlich starke Neigung, die im langperiodischen Amplitudenmaximum verhältnismäßig gering ist. Die Auswertung der Elliptizität in diesem Bereich zeigt für jede Station einen völlig anderen Verlauf.



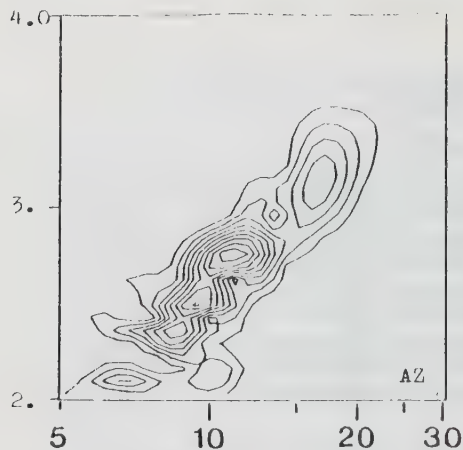
Vertikal-, NS-, EW-, Radial- und Transversal-Komponente
der Station A1, B1, C1



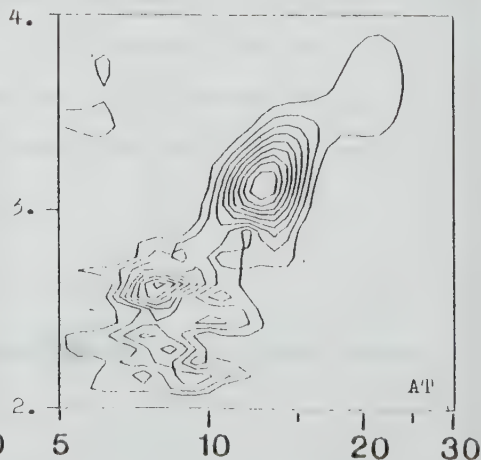
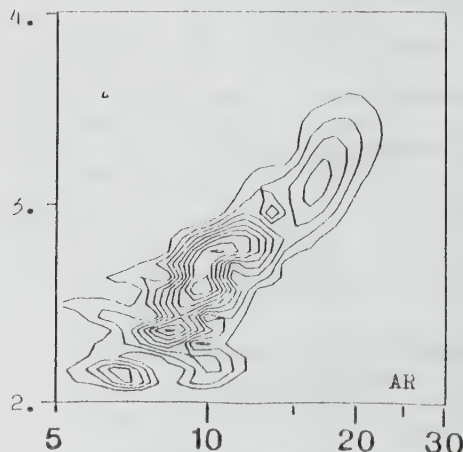
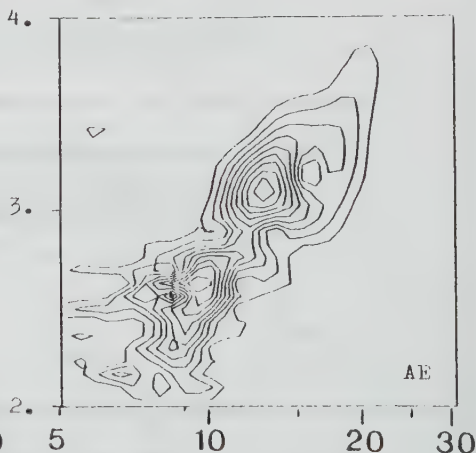
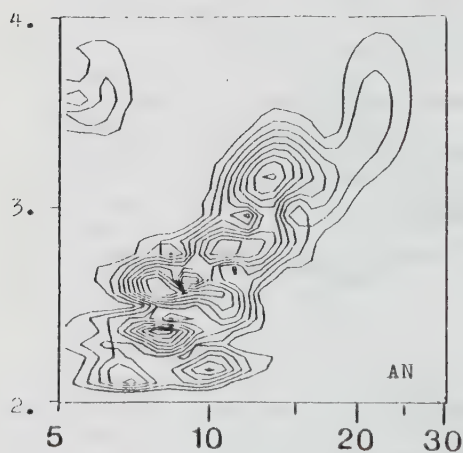
Vertikal-Komponenten der Stationen A1-C4
10sec-TP-gefiltert

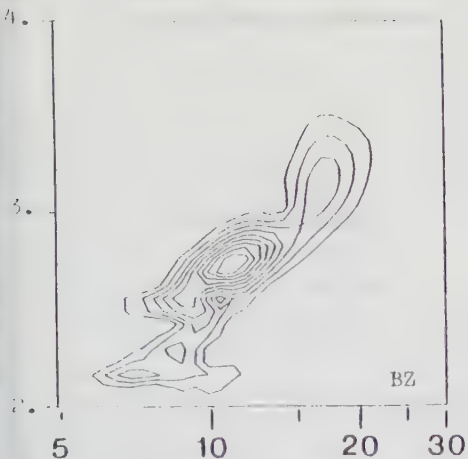


ω k-Analyse des Zeitfensters 580-650, Periode 9.4 sec

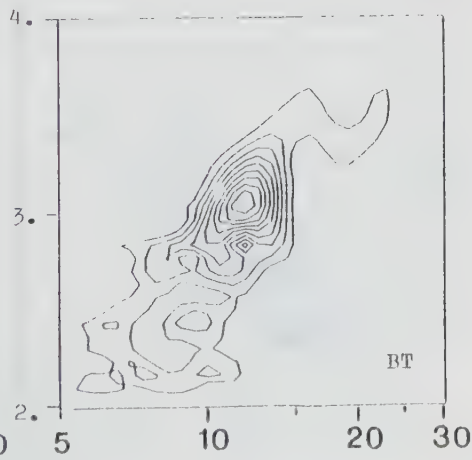
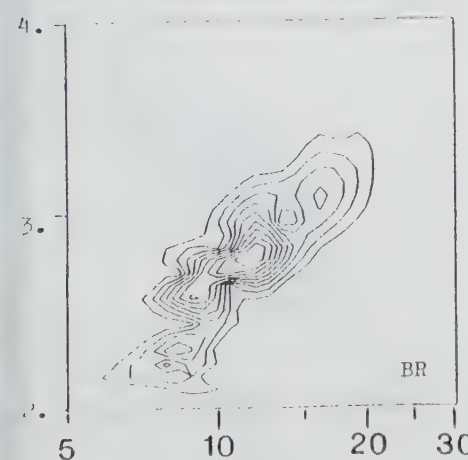
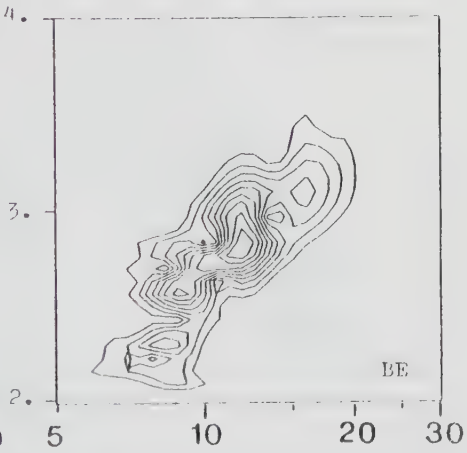
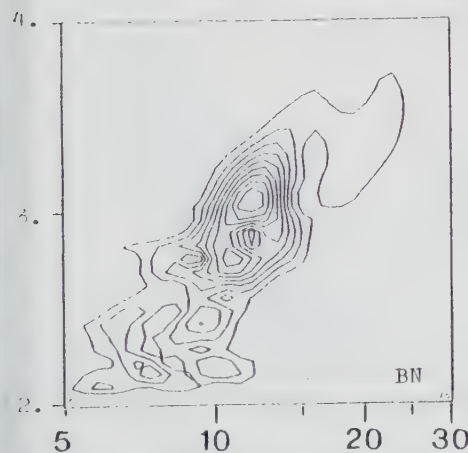


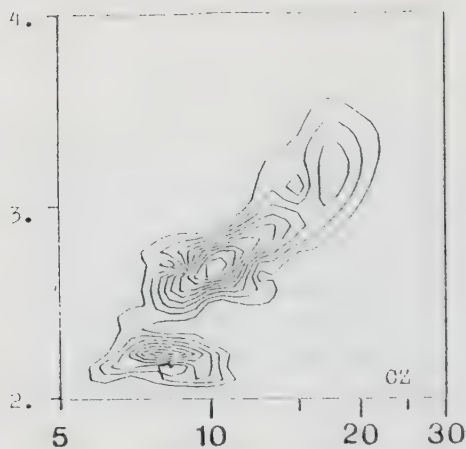
Gabor - Matritzen
der Station A1
horizontal : Periode (sec)
vertikal : Gruppengesch.
(km/sec)





Gabor - Matritzen
der Station B1
horizontal : Periode (sec)
vertikal : Gruppengesch.
(km/sec)





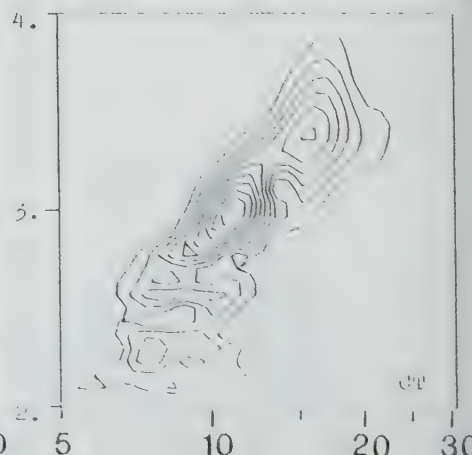
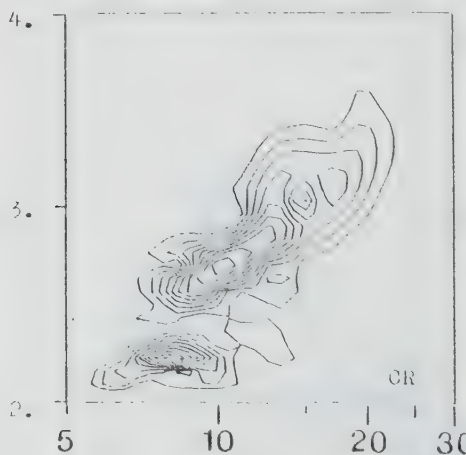
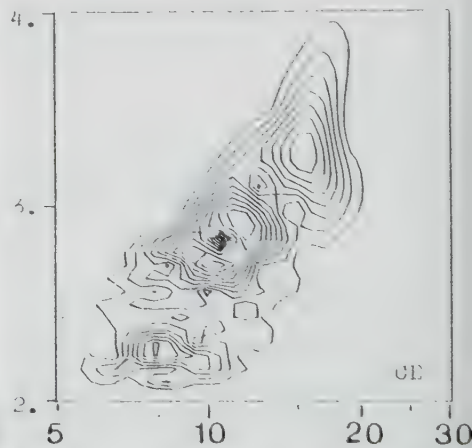
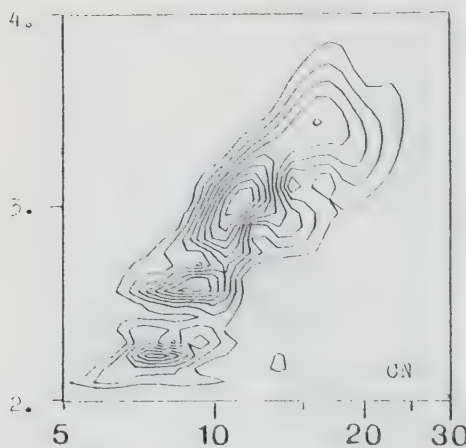
Gabor -Matritzen

der Station C1

horizontal : Periode (sec)

vertikal : Gruppengesch.

(km/sec)



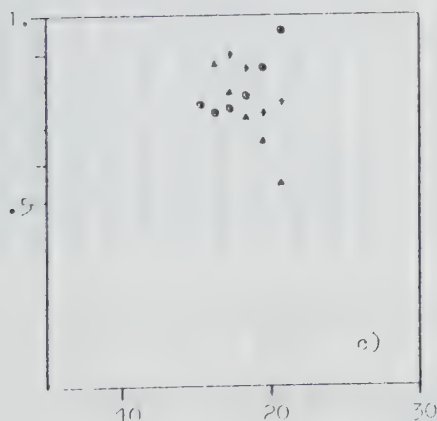
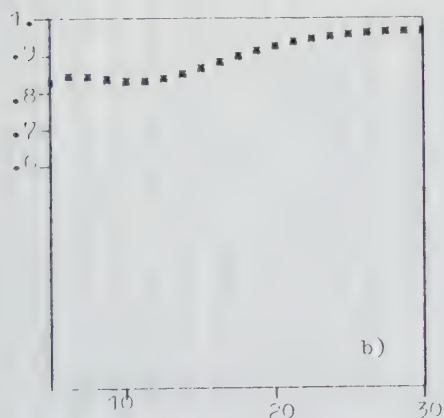
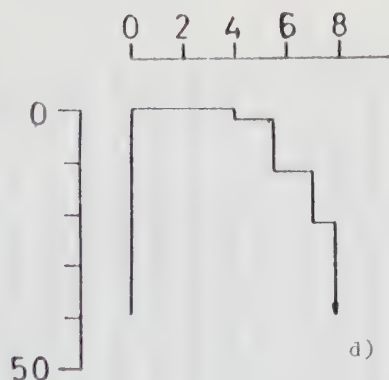
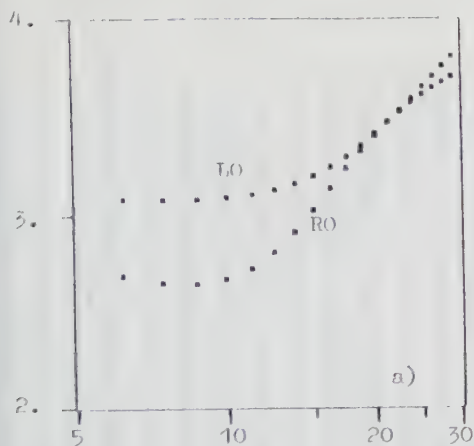
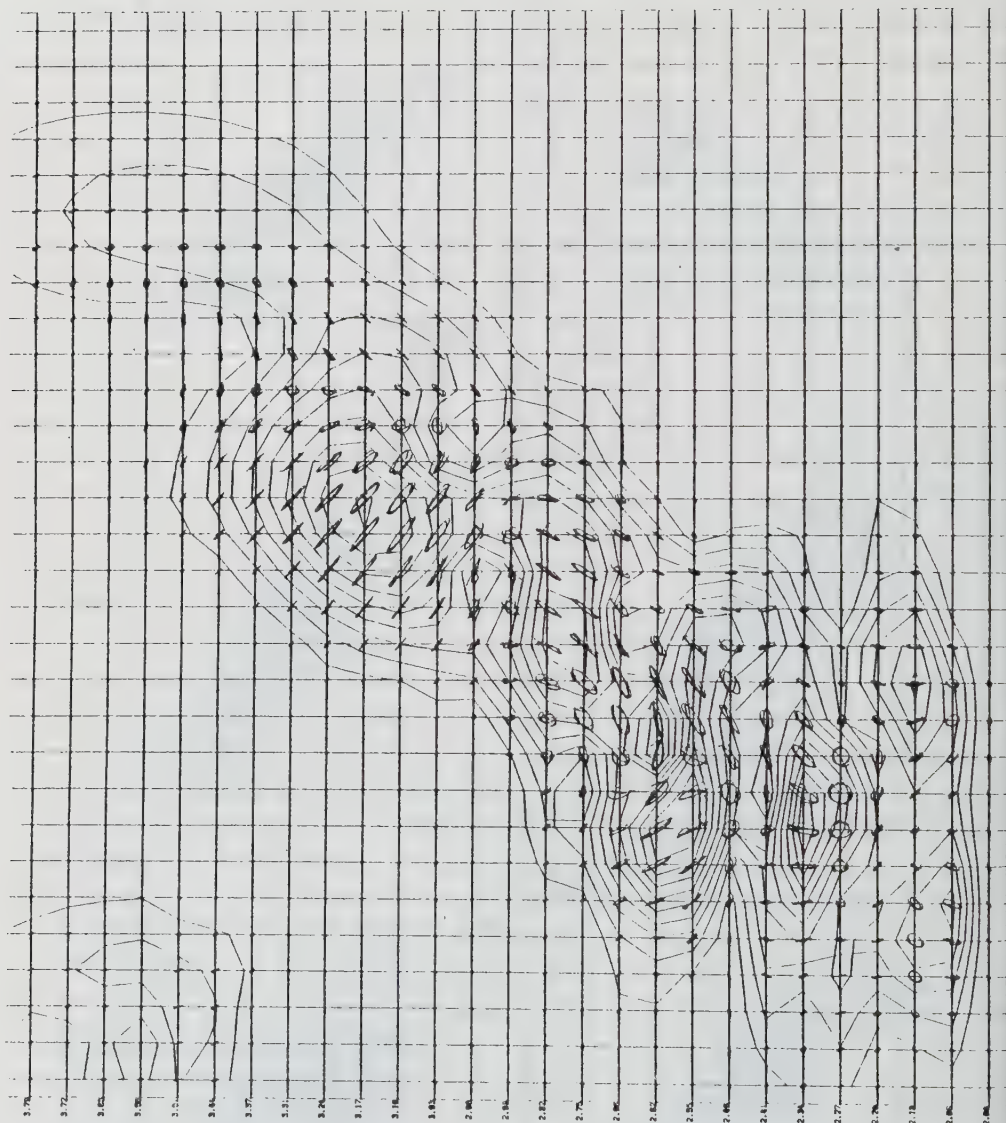


Abb. a) Theoretische Gruppengesch.-
Dispersion
horizontal : Periode (sec)
vertikal : v_g (km/sec)

Abb. b) und c)
Theoretische und gemessene
Elliptizitäten in Abhängig-
keit von der Periode
 $\odot \hat{= A1}$, $\Delta \hat{= B1}$, $+\hat{= C1}$

Abb. d) den theoretischen Kurven
zugrundeliegendes Geschwin-
digkeits-Tiefen-Modell.
Falls nicht anders vermerkt,
gilt $v_s = 1/\sqrt{3} v_p$



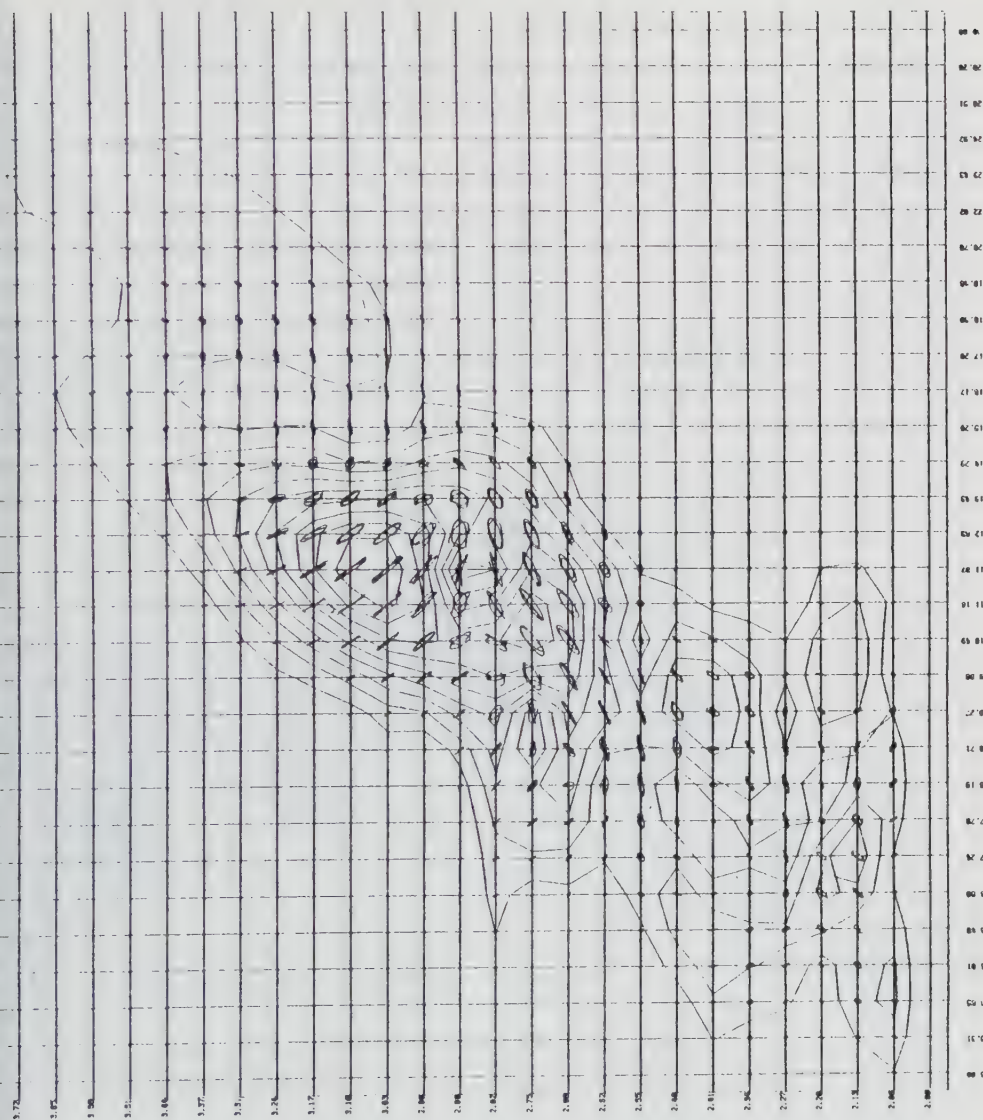
Polarisations-Dispersions-Matrix der Horizontal-Komponenten
der Station A1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)



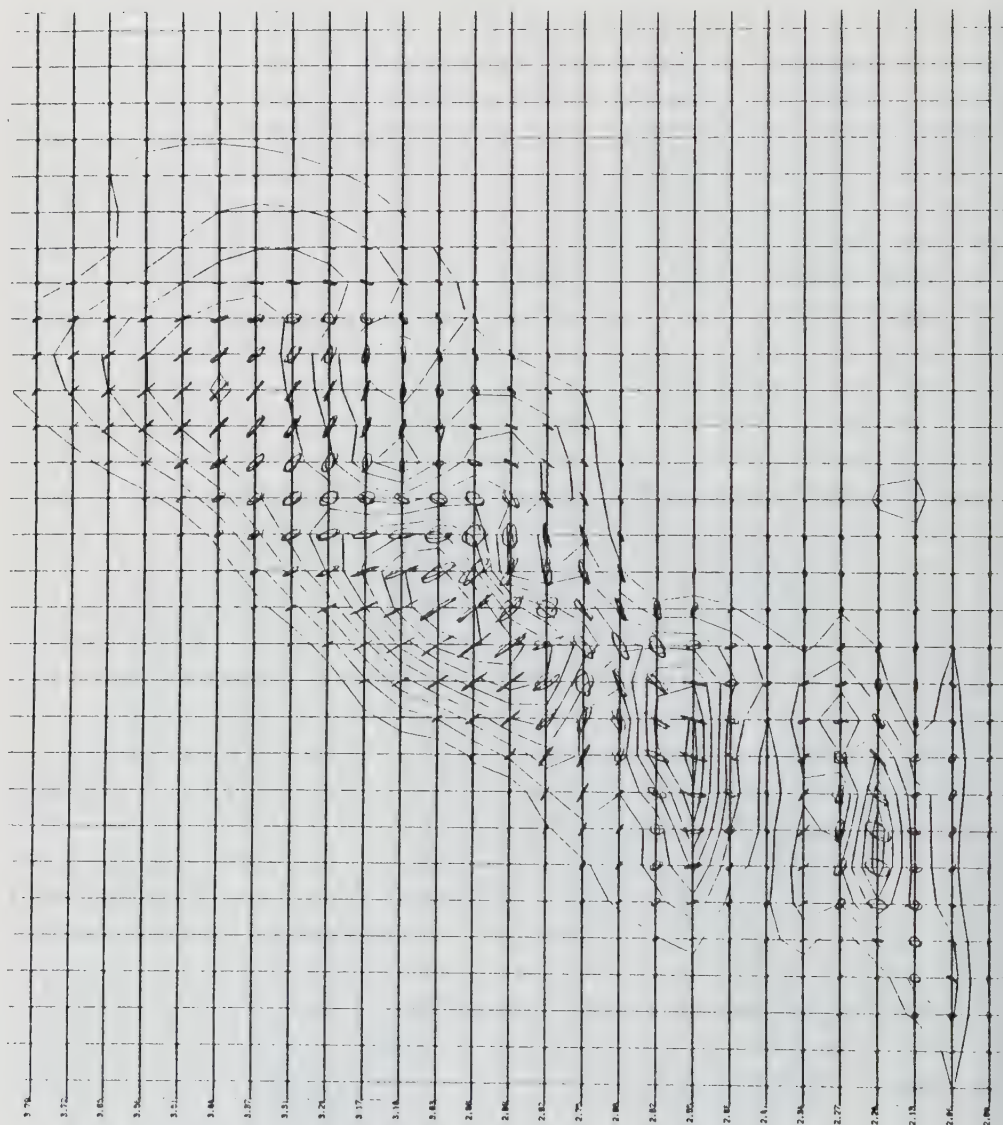
Polarisations-Dispersions-Matrix der Horizontal-Komponenten
der Station B1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)



Polarisations-Dispersions-Matrix der Horizontal-Komponenten
der Station C1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)

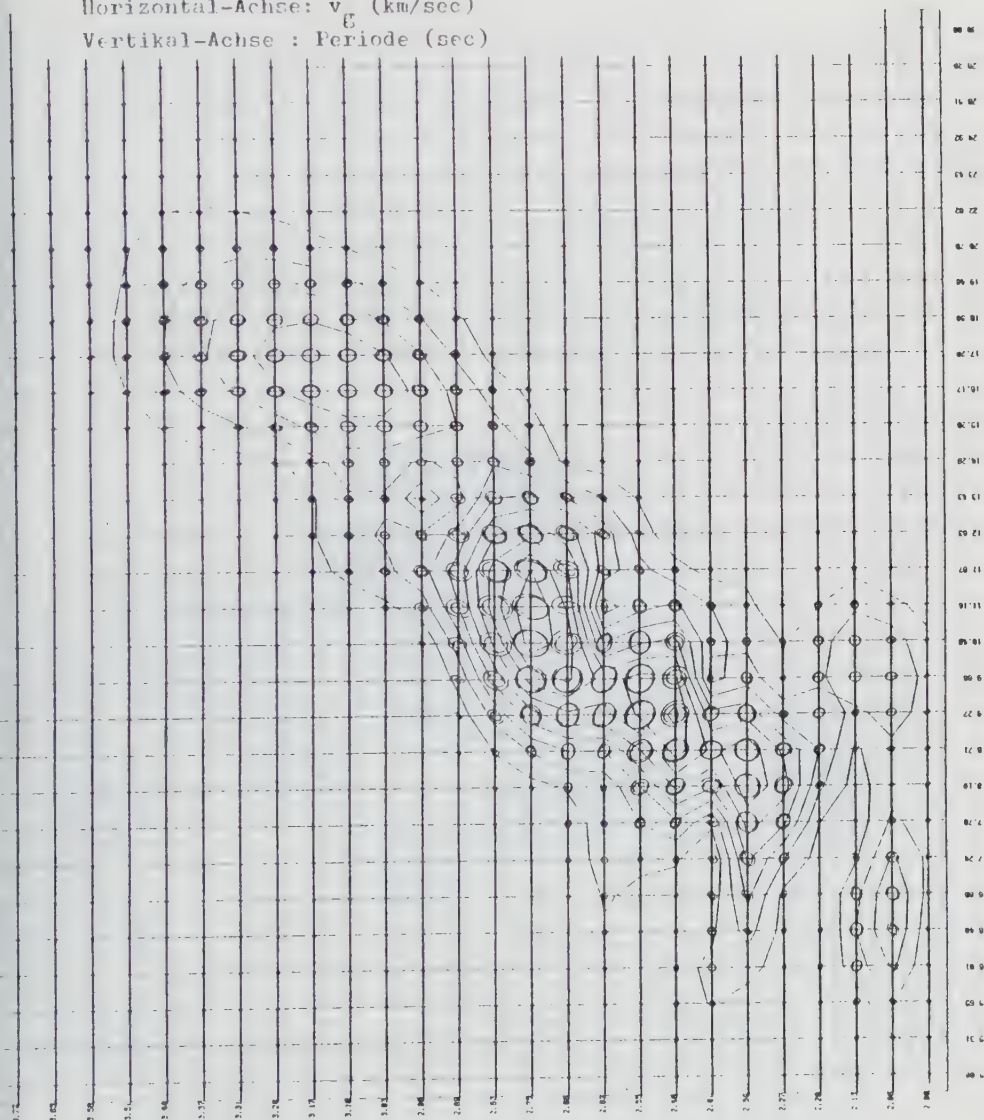
Polarisations-Dispersions-Matrix der Z- und R-Komponente
der Station A1

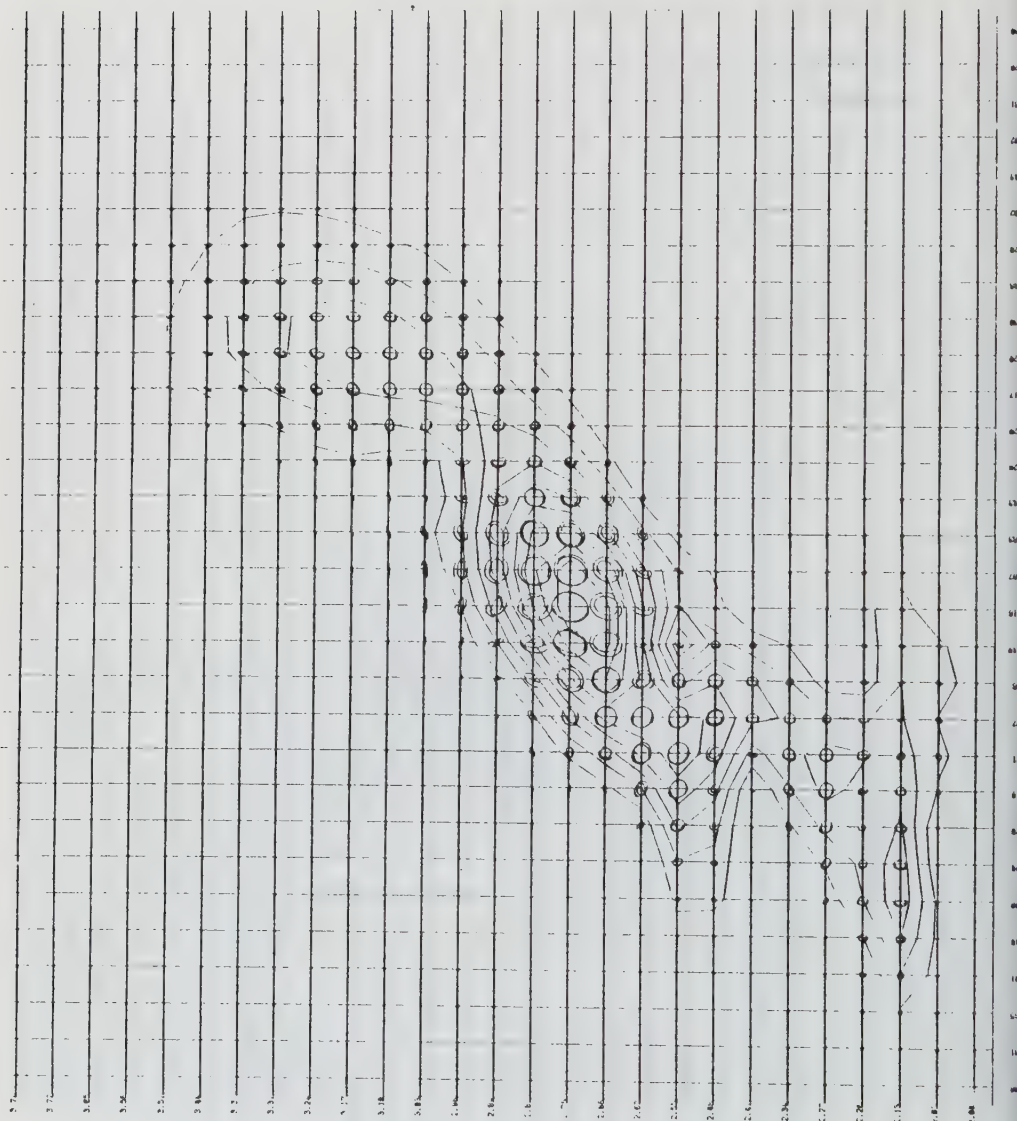
Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_E (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)





Polarisations-Dispersions-Matrix der Z- und R-Komponente
der Station B1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)

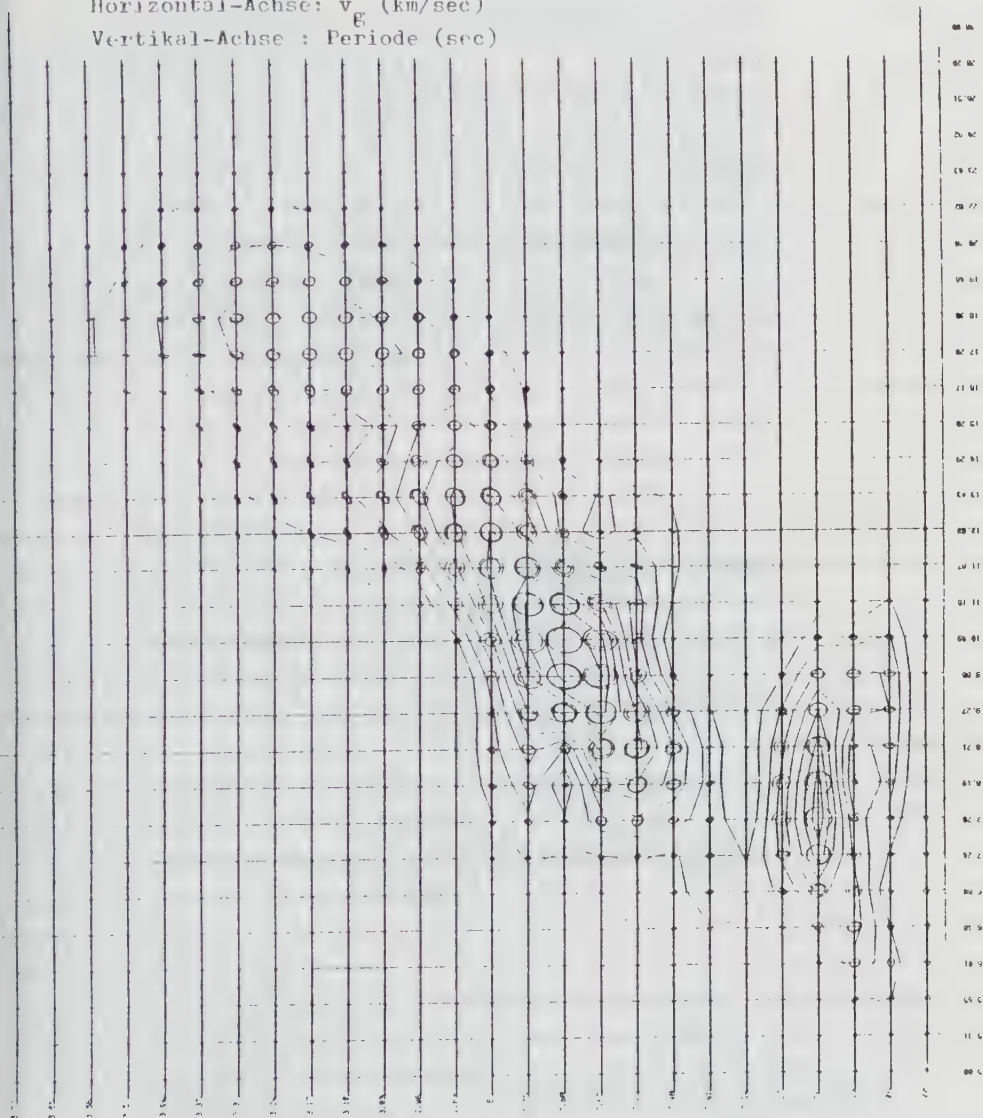
Polarisations-Dispersions-Matrix der Z- und R-Komponente
der Station C1

Orientierung der Hodographen :



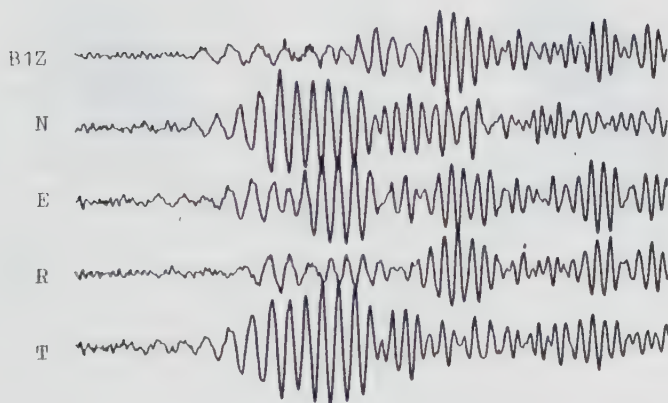
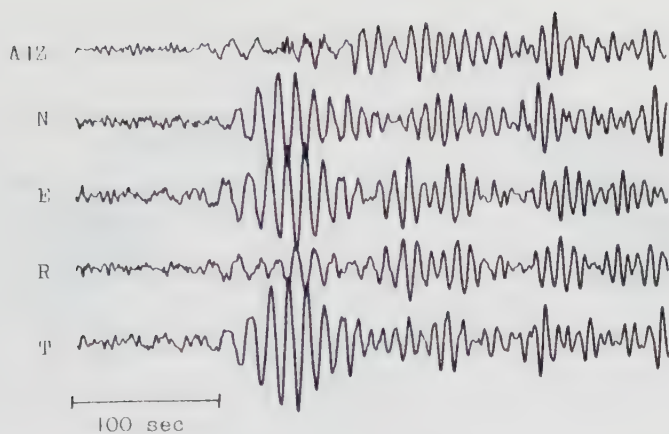
Horizontal-Achse: v_E (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)

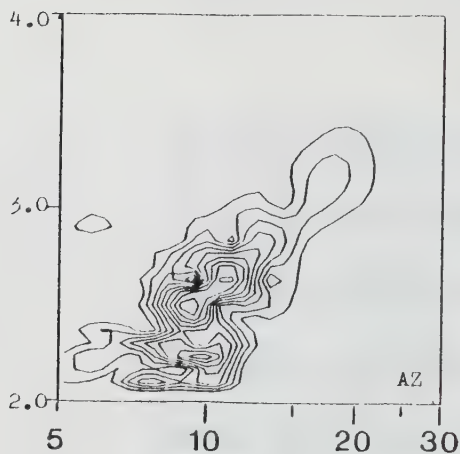


Algerien (2)

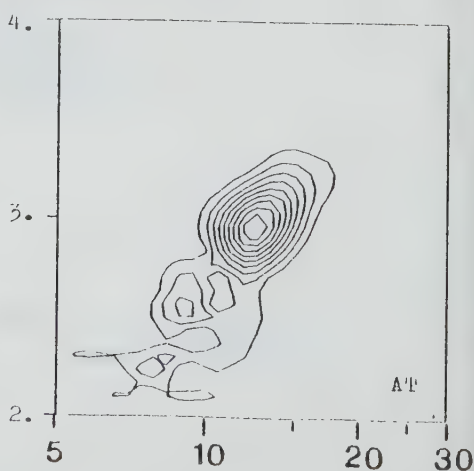
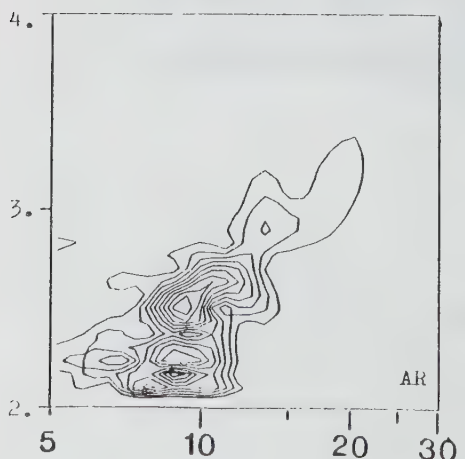
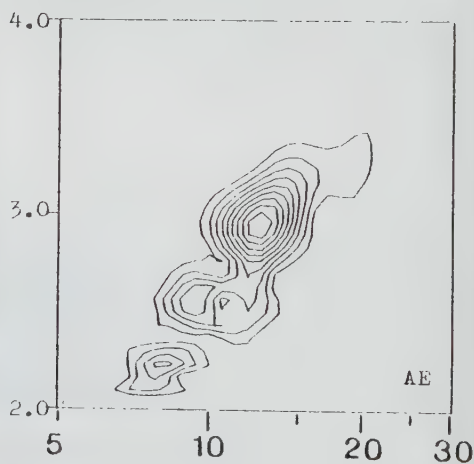
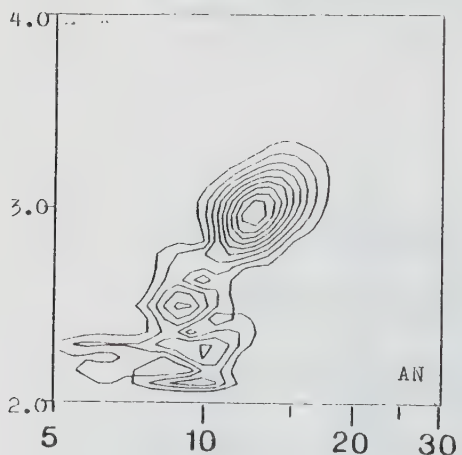
In den 3-K-Registrierungen der A1- und B1-Station fällt bei den H-Komponenten sofort die stark angeregte L0-Mode auf. Sie zeigt ebenso wie die K0-Mode Amplitudenmodulation und Phasensprünge, was ebenfalls wie die schwache Ähnlichkeit zwischen den Stationen, auf eine Ausbreitung über mehrfache Wege hindeutet. Die PDMs der H-Komponenten zeigen im ersten Amplitudenmaximum stark lineare Polarisation, wobei eine geringe Öffnung die Interferenz mehrerer Wellen nachweist. Die Richtung der Teilchenbewegung im Bereich des Amplitudenmaximums beträgt bei beiden Stationen ca. 45 grd W, was für die Love-Welle etwa 12 grd zu wenig im Vergleich zum geographischen Azimut ist. Die Polarisation im weiteren Verlauf der Welle ist durchweg uneinheitlich. Die Drehung der H-Komponenten macht nochmals deutlich, wie stark die L0-Mode im Vergleich zur K0-Mode angeregt wurde. Die Schwingungsellipsen in der Saggitalebene zeigen ein uneinheitliches Verhalten, daß auf eine weitere Bearbeitung des Ereignisses verzichtet wurde.

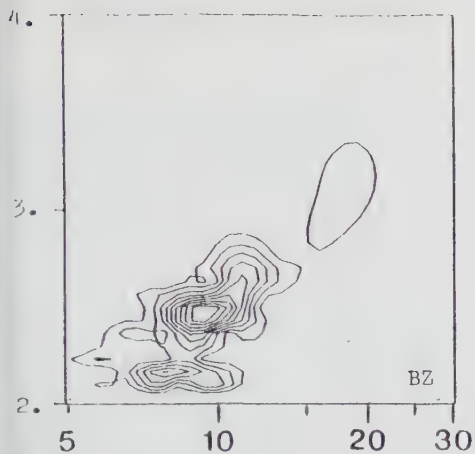


Vertikal-, NS-, EW-, Radial- und Transversal-Komponente
der Station A1, B1

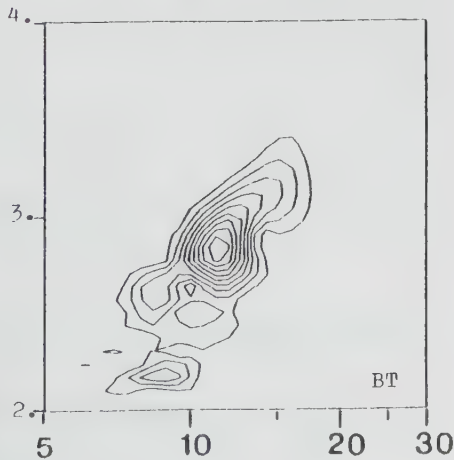
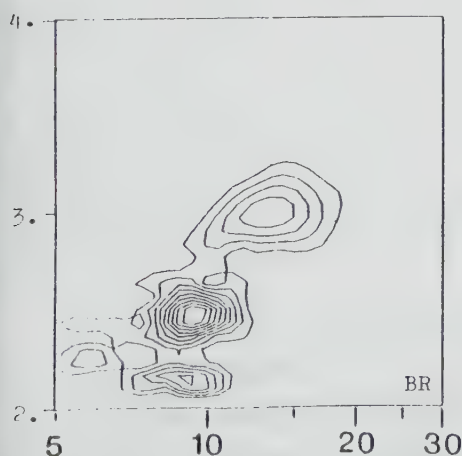
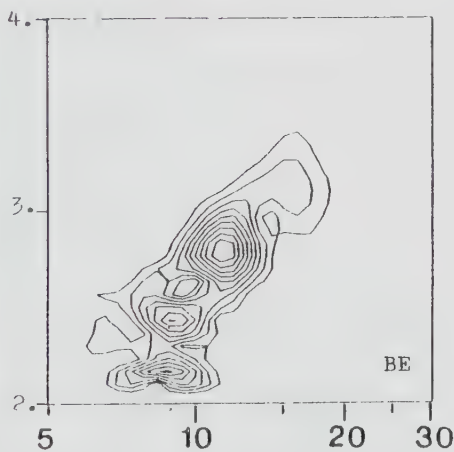
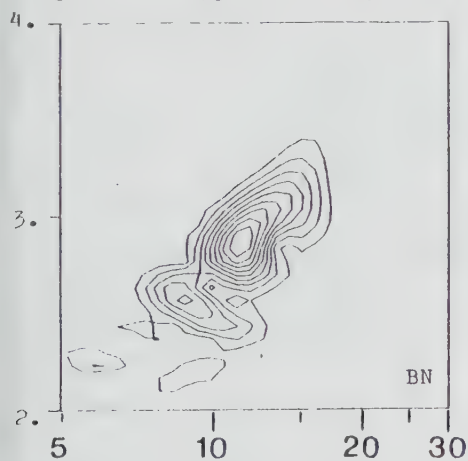


Gabor - Matritzen
der Station A1
horizontal : Periode (sec)
vertikal : Gruppengesch.
(km/sec)





Gabor - Matrizen
 der Station B1
 horizontal : Periode (sec)
 vertikal : Gruppengesch.
 (km/sec)



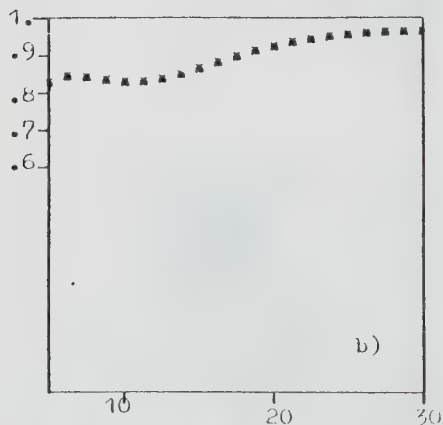
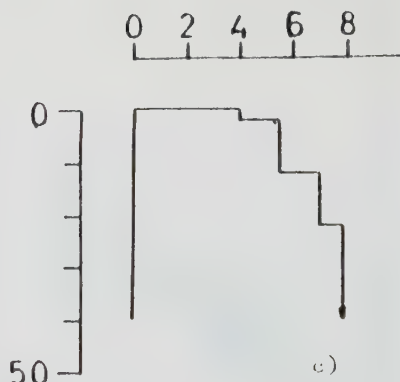
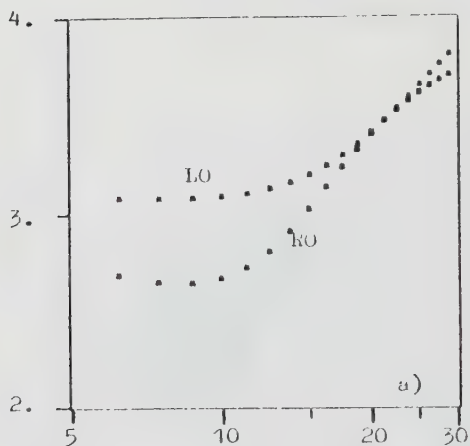
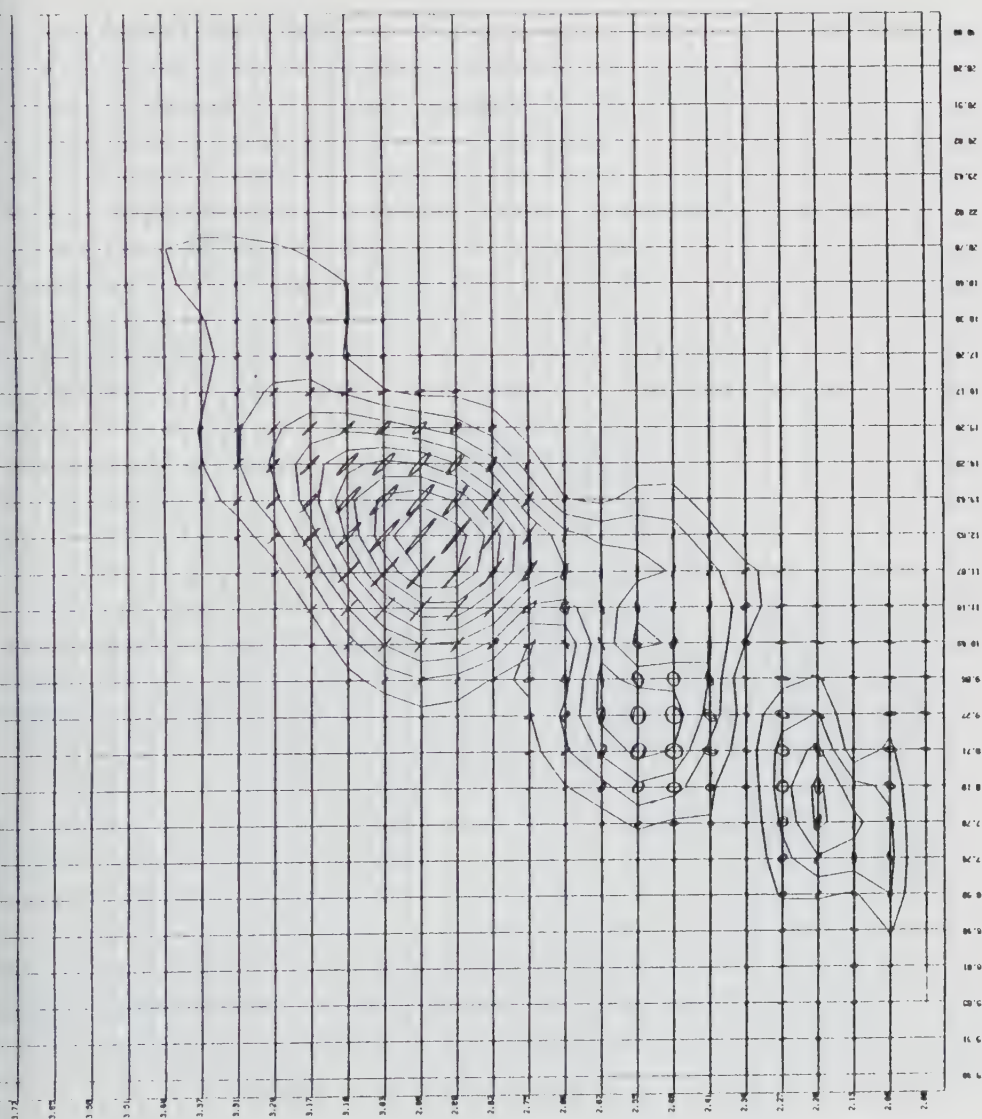


Abb. a) Theoretische Gruppengesch.-
Dispersion
horizontal : Periode (sec)
vertikal : v_g (km/sec)

Abb. b) Theoretische
Elliptizität in Abhängig-
keit von der Periode

Abb. c) den theoretischen Kurven
zugrundeliegendes Geschwin-
digkeits-Tiefen-Modell.
Falls nicht anders vermerkt
gilt $v_s = 1/\sqrt{3} v_p$



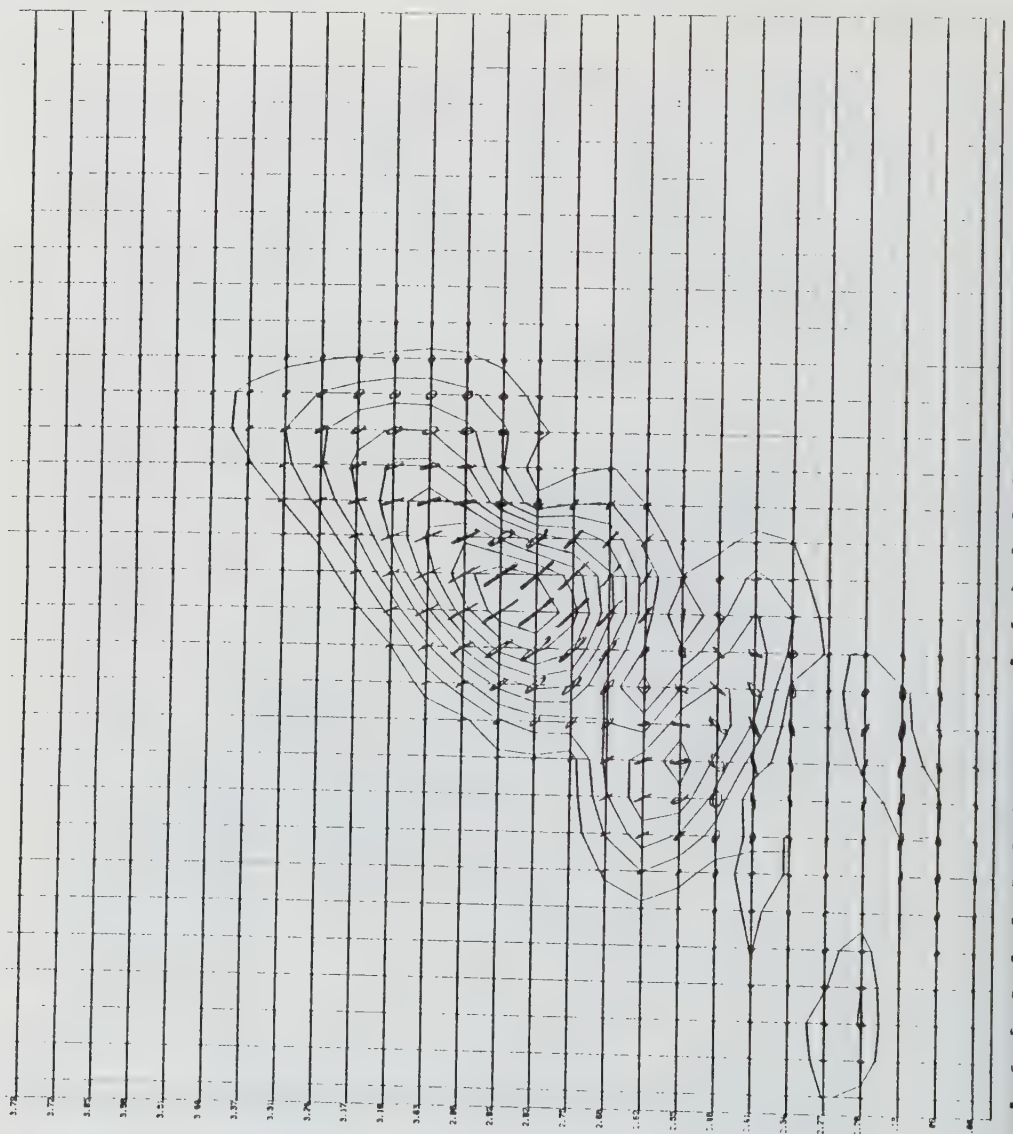
Polarisations-Dispersions-Matrix der Horizontal-Komponenten
der Station A1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)



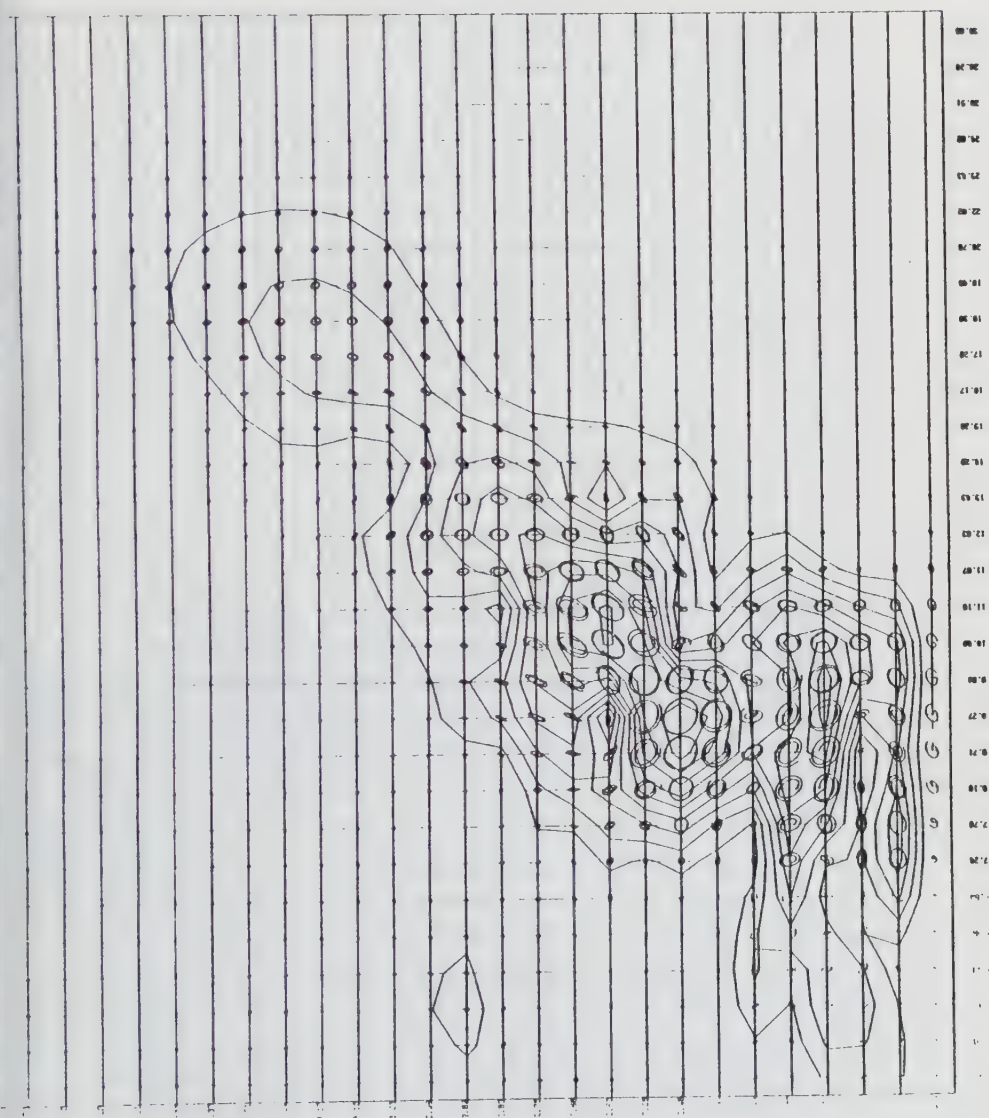
Polarisations-Dispersions-Matrix der Horizontal-Komponenten
der Station B1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)



Polarisations-Dispersions-Matrix der Z- und R-Komponente
der Station A1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)

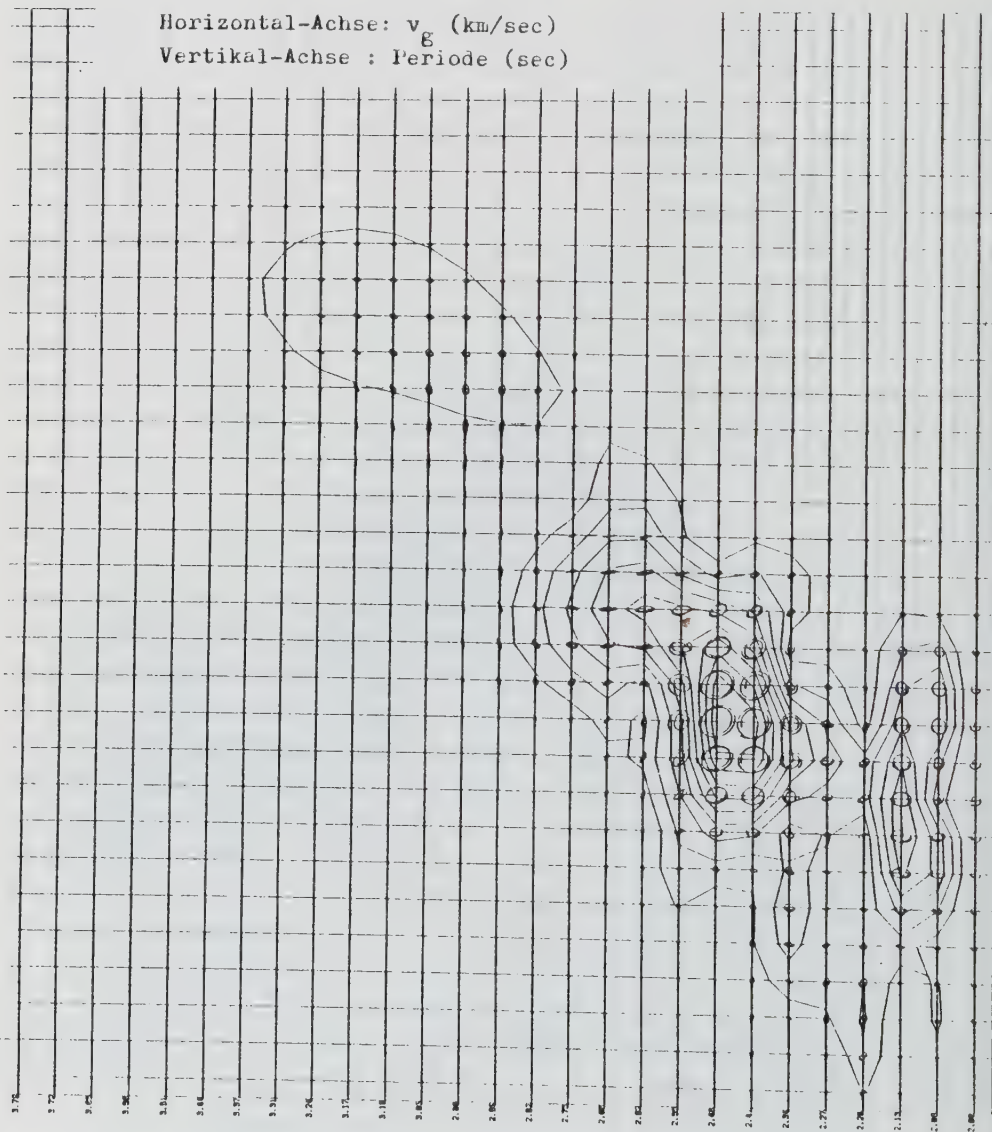
Polarisations-Dispersions-Matrix der Z- und R-Komponente
der Station B1

Orientierung der Hodographen :



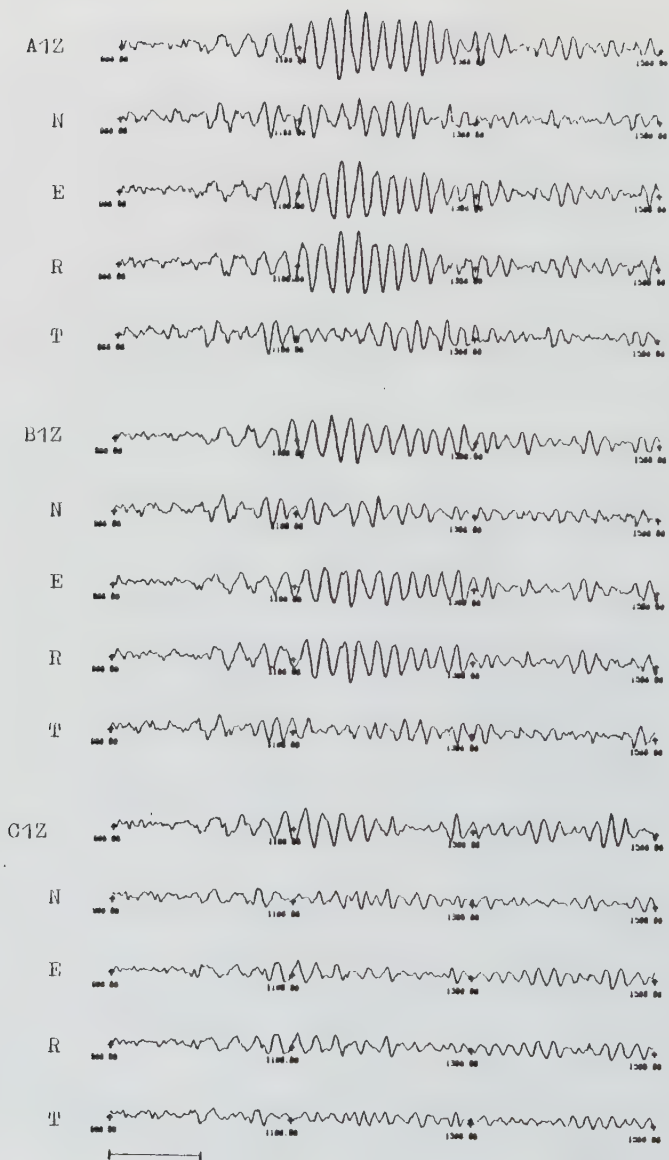
Horizontal-Achse: v_E (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)

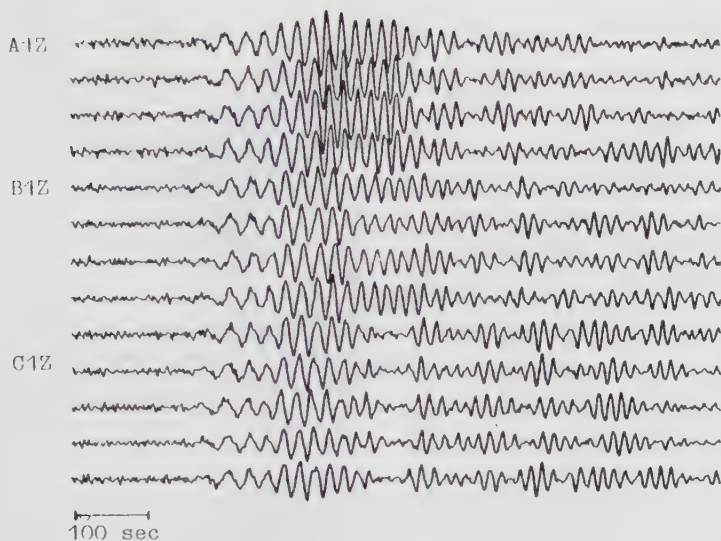


Kane Fracture-Zone

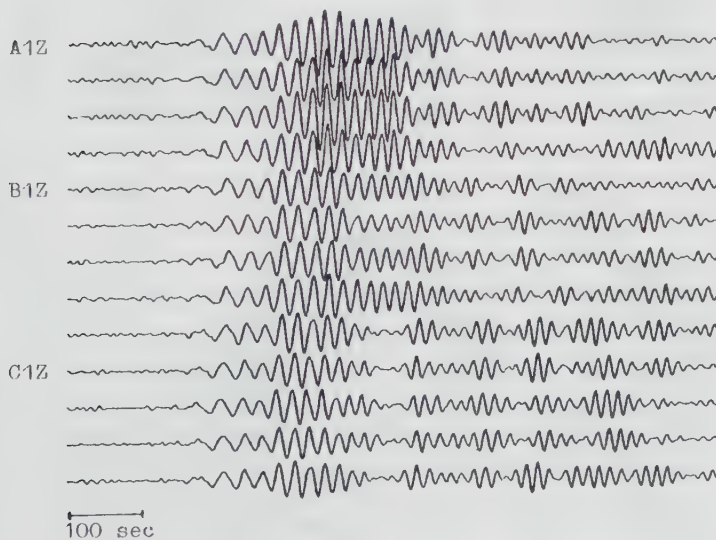
In den Montagen der 3K-Registrierungen erkennt man einen langgezogenen schwach dispergierten Wellenzug mit relativ großen Amplituden, der jedoch bei den H-Komponenten der C1-Station nicht mehr deutlich zu erkennen ist; auch zeigt sich bei der C1-Z-Komponente ein Amplitudenminimum bei der Zeitmarke 1250, das der A1-Z- und der B1-Z-Komponente fehlt. Dieses Amplitudenminimum ist, wie in der Montage aller GKF-Z-Stationen zu erkennen ist, im gesamten C-Subarray und der Station B5 deutlich ausgeprägt und deutet sich bei den Stationen B2 und B3 an, was als Hinweis auf eine Interferenz durch multiple Wege gewertet werden muß. Die PDMs der H-Komponenten zeigen in der Nähe der Energiemaxima nahezu lineare Polarisation die ein Azimut von 117 grd W bei allen Stationen aufweist. Das abwechselnde Öffnen und Schließen der Schwingungsellipsen, besonders gut bei der Station B1 zu beobachten, ist ein weiteres Indiz für eine Überlagerung von Wellen unterschiedlichen Azimuts und unterschiedlicher Phasengeschwindigkeit. Ab der Geschwindigkeit 3,2 km/sec, bei der das in der Montage zu beobachtende Amplitudenminimum auftritt, ist in Richtung geringerer Geschwindigkeiten die Polarisationsrichtung völlig uneinheitlich. Obwohl dieser Teil der Welle dem Trend der Dispersion folgt, muß man ihn wohl doch bereits als Coda betrachten. Bei Perioden um 16 sec und Geschwindigkeiten um 3,6 km/sec ist ein Wellenteil mit nahezu linearer Polarisation zu erkennen, dessen Polarisationsrichtung in guter Näherung senkrecht zum geographischen Azimut ist. Die wkA ergibt in den Zeitintervallen vor dem Interferenzminimum keinen direkten Hinweis auf eine Überlagerung von Wellen, worauf aber die relativ starke Streuung der Azimute für benachbarte Perioden hindeutet. In der Montage aller Z-Komponenten sind in der Coda zahlreiche Wellenpakete zu erkennen, die sich mehr oder minder über das gesamte Array verfolgen lassen. Die wkA der Coda im Periodenbereich von ca. 14-18 sec ergibt neben Energiemaxima, die aus der Epizentralrichtung kommen, auch deutlich Wellenanteile, deren Azimute ca. 90 grd vom geographischen abweichen. Die Drehung der H-Komponenten um 117 grd bewirkt den Z-Komponenten sehr ähnliche R-Komponenten und hebt in den T-Komponenten ein Amplitudenmaximum bei der Zeitmarke 1100 hervor. Die PDMs der R- und Z-Komponenten zeigen auch im Bereich maximaler Energie z.T. stark geneigte Ellipsen. Auffallend ist die starke Elongation der Ellipsen bei der C1-Station. Entsprechend den bisherigen Betrachtungen zeigen auch die Halbachsen-Verhältnisse sowohl periodenabhängig als auch im Vergleich der Stationen große Streuung. Die Inversion der R0-Gruppengeschwindigkeits-Dispersion gelingt in Anbetracht des gemischten Ausbreitungsweges recht gut. Wenngleich die Gabor-Matrizen der T-Komponenten keine einheitliche Dispersionskurve einzuzeichnen erlauben, bleibt das Amplitudenmaximum bei der Zeitmarke 1100 durch die theoretische Dispersionskurve für die 10- Mode unerklärt. Hier drängt sich der Verdacht auf, daß es sich um einen an einer Ozean-Kontinent-Grenze konvertierten Wellenteil handelt.

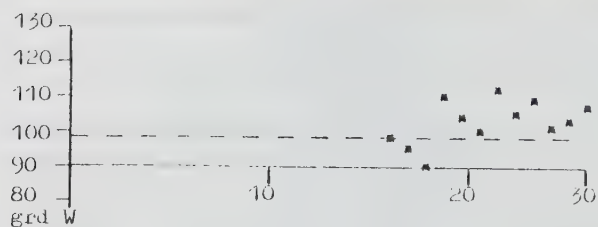


Vertikal-, NS-, EW-, Radial- und Transversal-Komponente
der Station A1, B1, C1

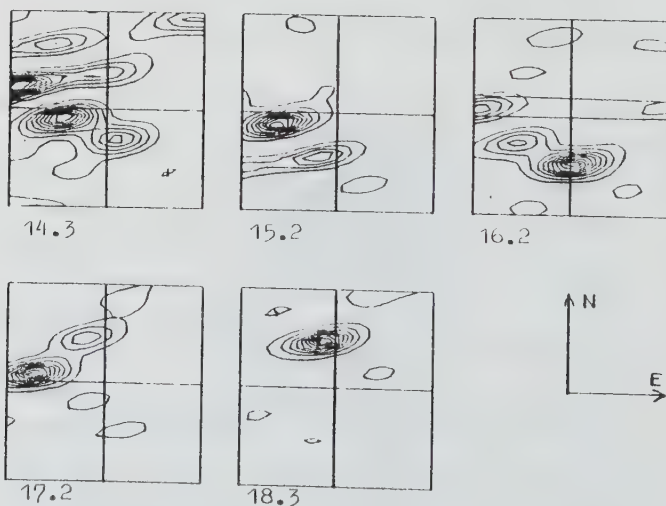


Vertikal-Komponenten der Stationen A1-C4 ,
10sec-TP-gefiltert (unten)

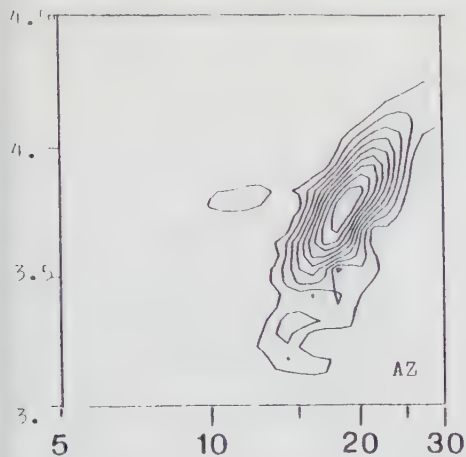




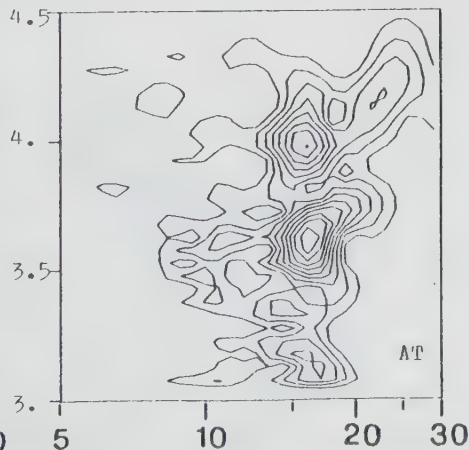
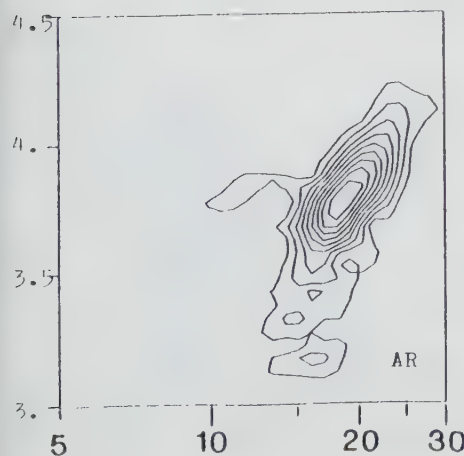
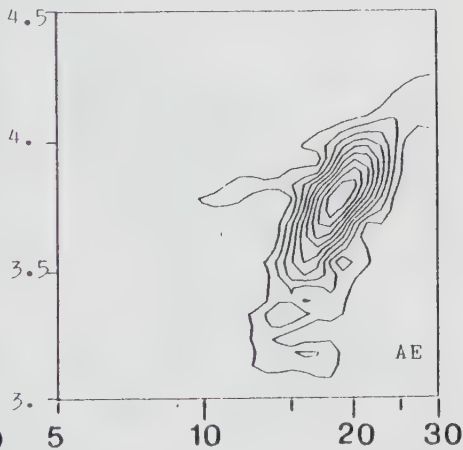
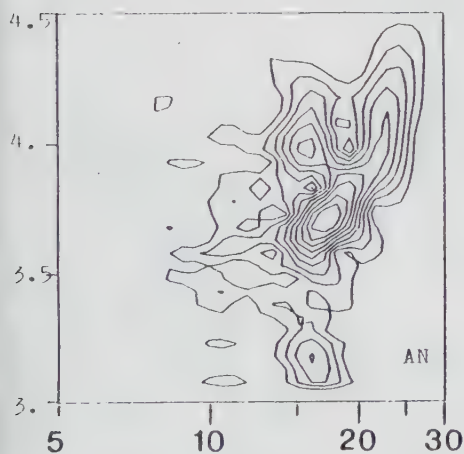
Ankunftsrichtung der RO-Mode in
Abhängigkeit von der Periode
gemäß der ω -k-Analyse

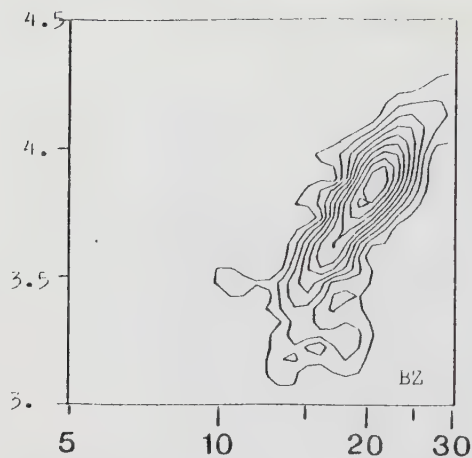


WK-Analyse der Coda ; Zahlen unter den Abb. geben die
Periode in sec an

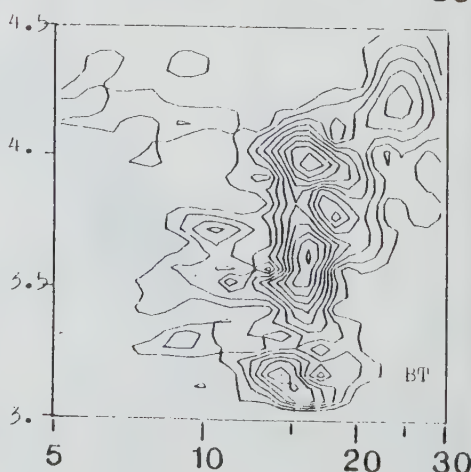
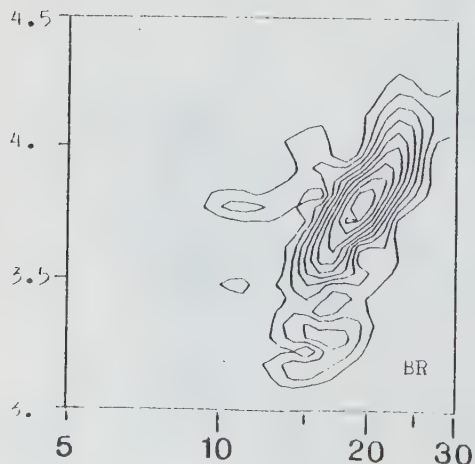
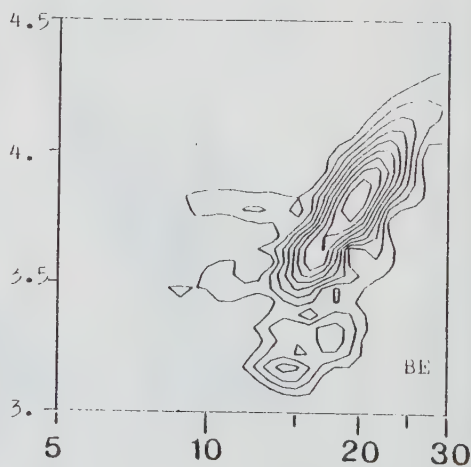
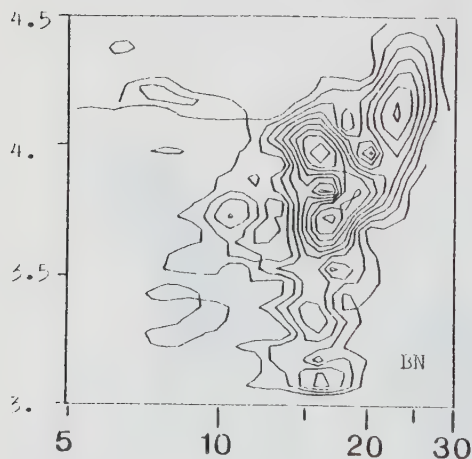


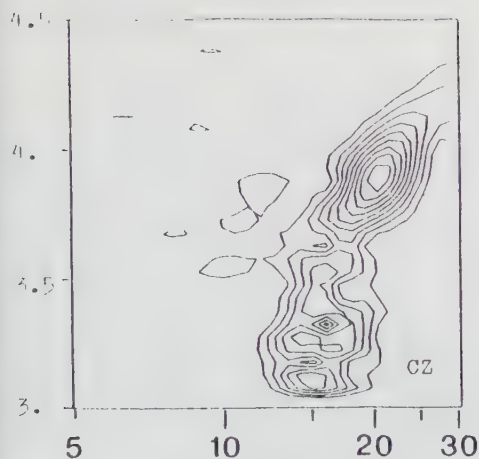
Gabor - Matritzen
der Station A1
horizontal : Periode (sec)
vertikal : Gruppengesch.
(km/sec)



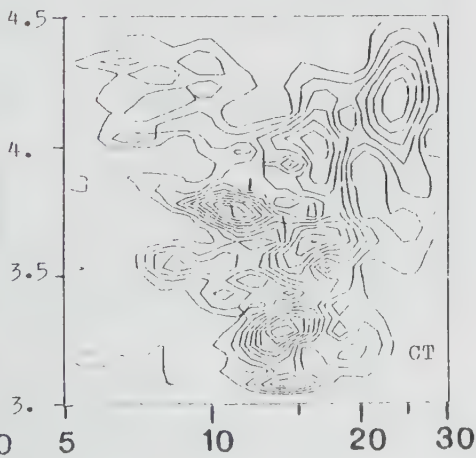
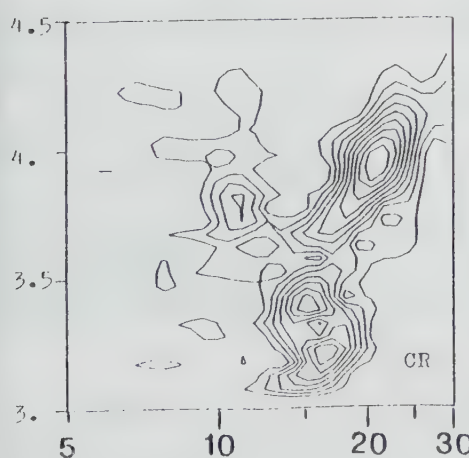
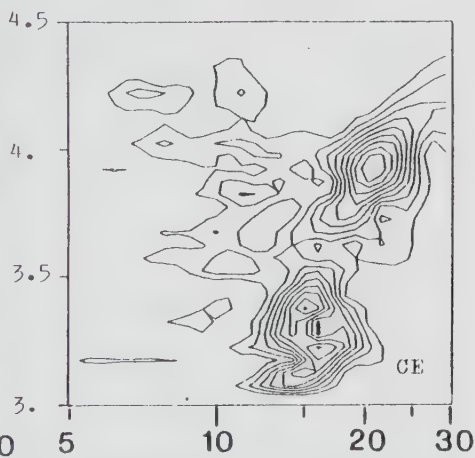
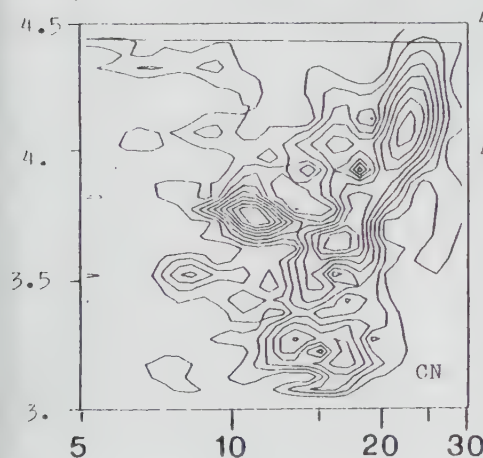


Gabor - Matrizen
der Station B1
horizontal : Periode (sec)
vertikal : Gruppengesch.
(km/sec)





Gabor -Matritzen
der Station C1
horizontal : Periode (sec)
vertikal : Gruppengesch.
(km/sec)



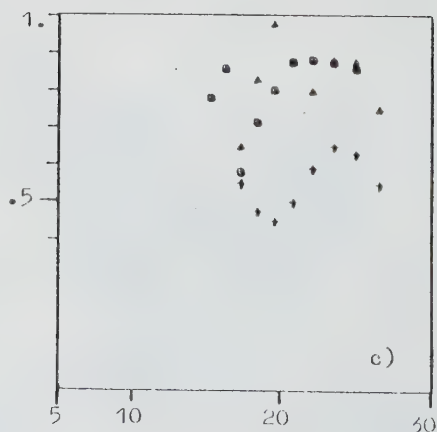
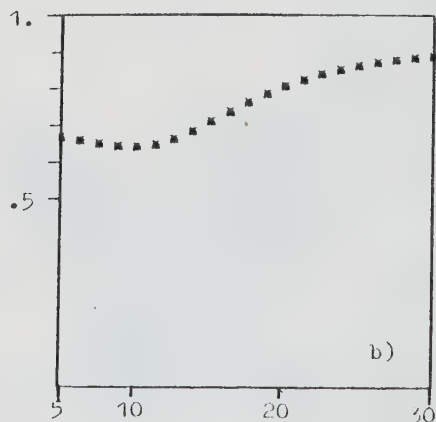
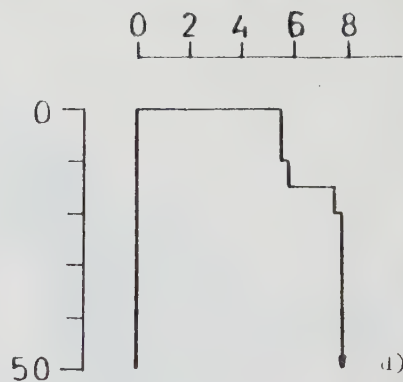
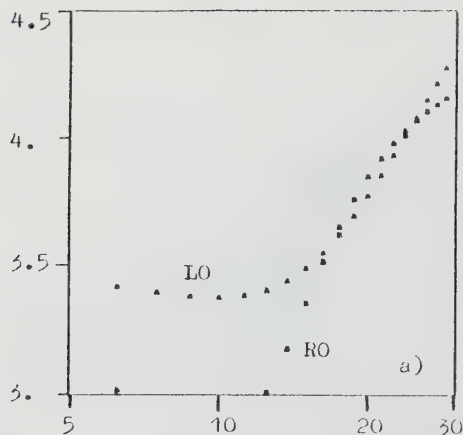
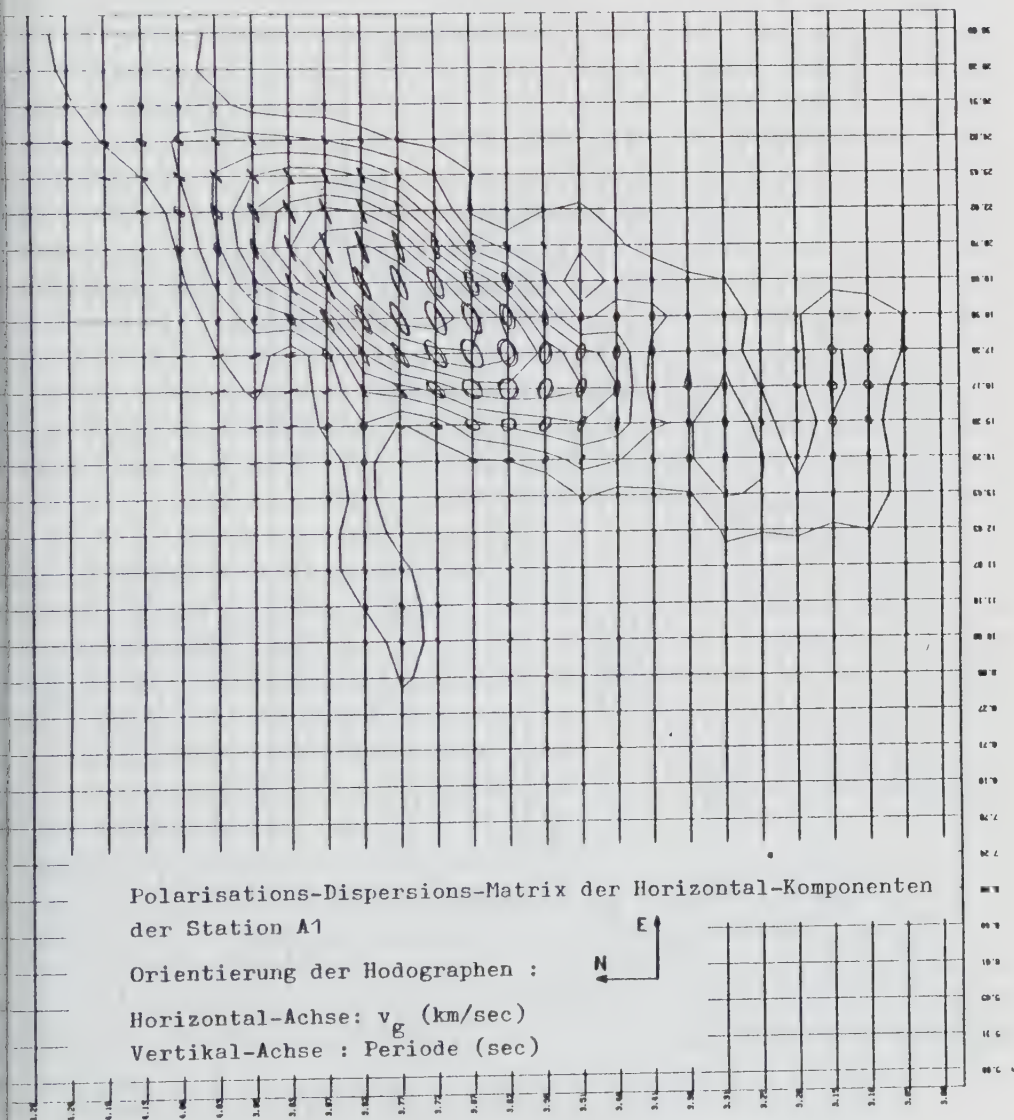
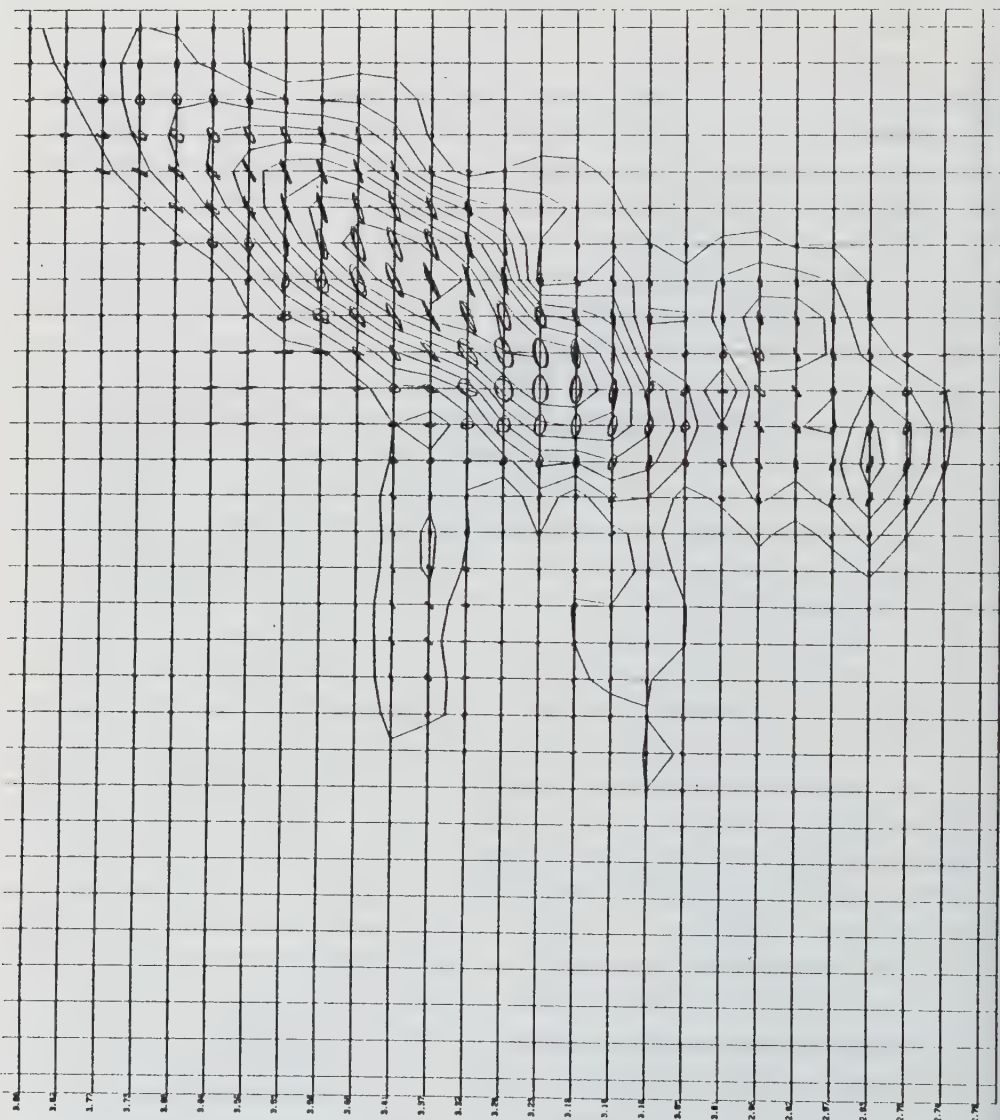


Abb. a) Theoretische Gruppengesch.
Dispersion
horizontal : Periode (sec)
vertikal : v_g (km/sec)

Abb. b) und c)
Theoretische und gemessene
Elliptizitäten in Abhängig-
keit von der Periode
 $\bigcirc \hat{=} A1$, $\Delta \hat{=} B1$, $+\hat{=} C1$

Abb. d) den theoretischen Kurven
zugrundeliegendes Geschwin-
digkeits-Tiefen-Modell.
Falls nicht anders vermerk-
t gilt $v_s = 1/\sqrt{3} v_p$





Polarisations-Dispersions-Matrix der Horizontal-Komponenten
der Station B1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

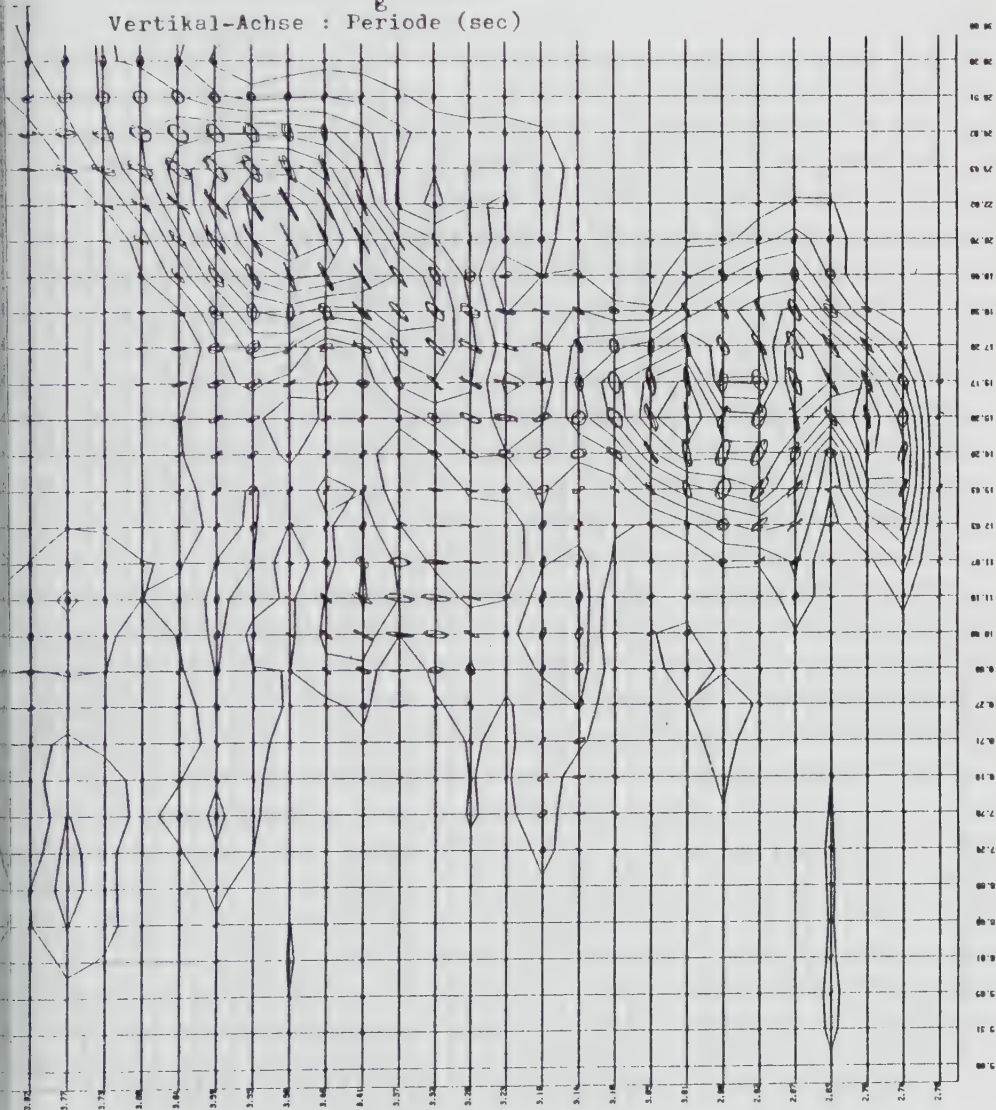
Vertikal-Achse : Periode (sec)

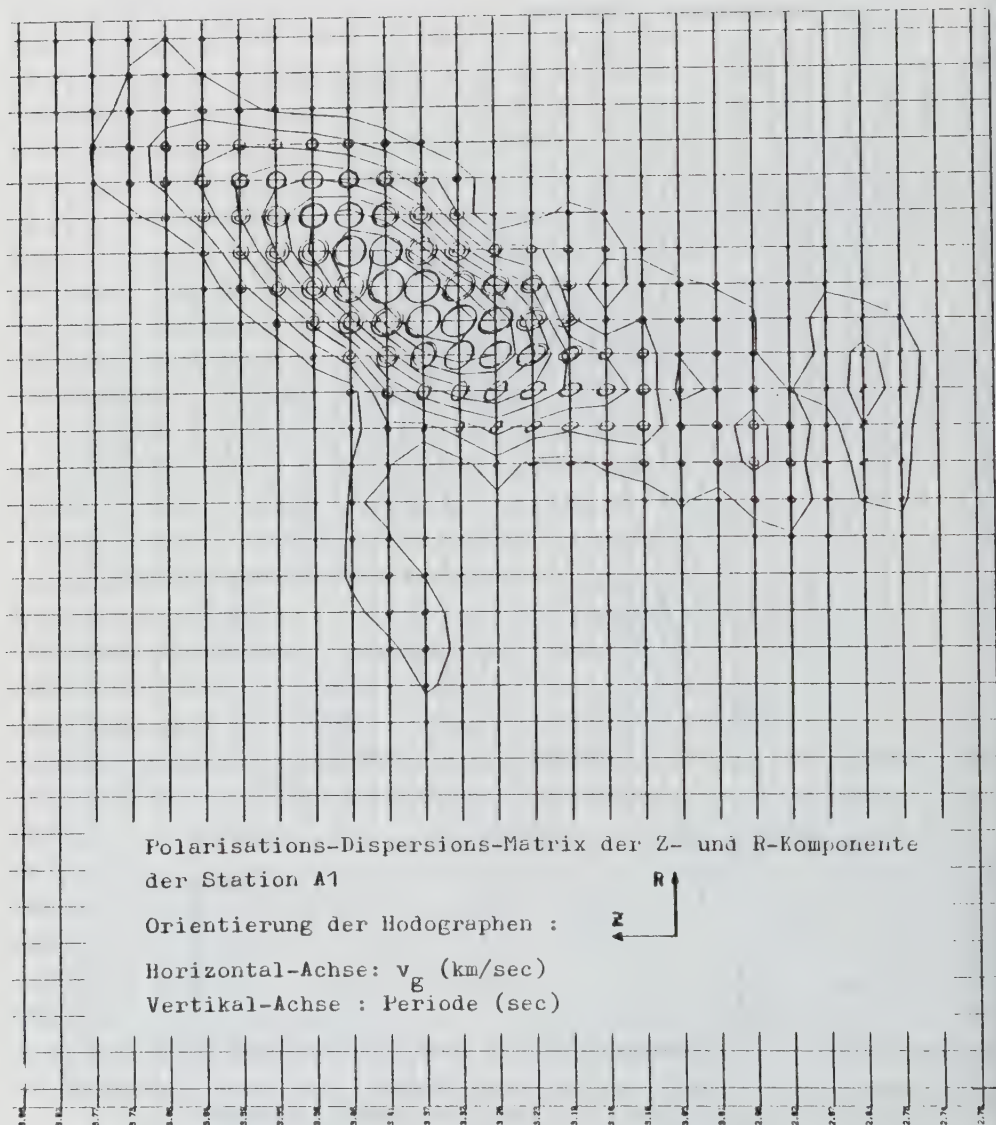
Polarisations-Dispersions-Matrix der Horizontal-Komponenten der Station C1

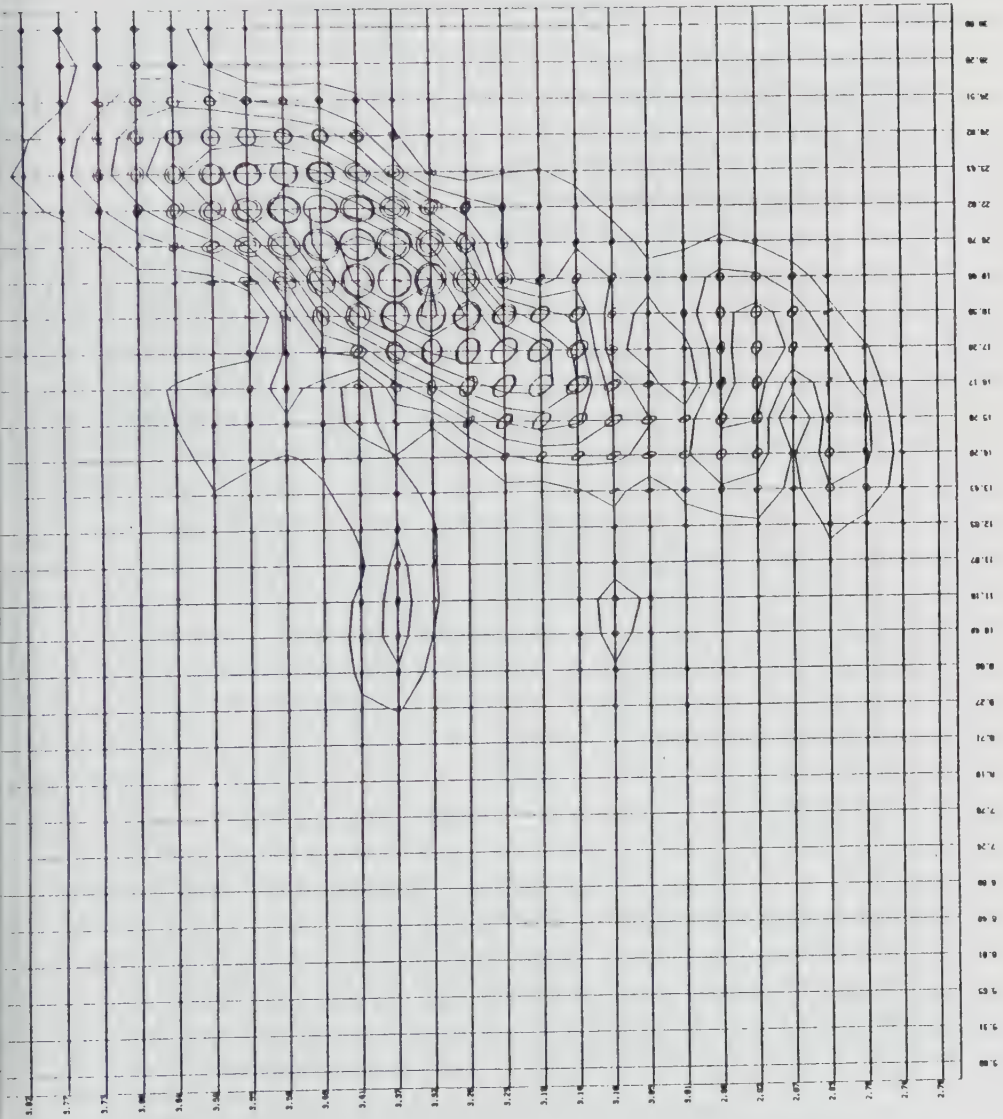
Orientierung der Hodographen :

Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)







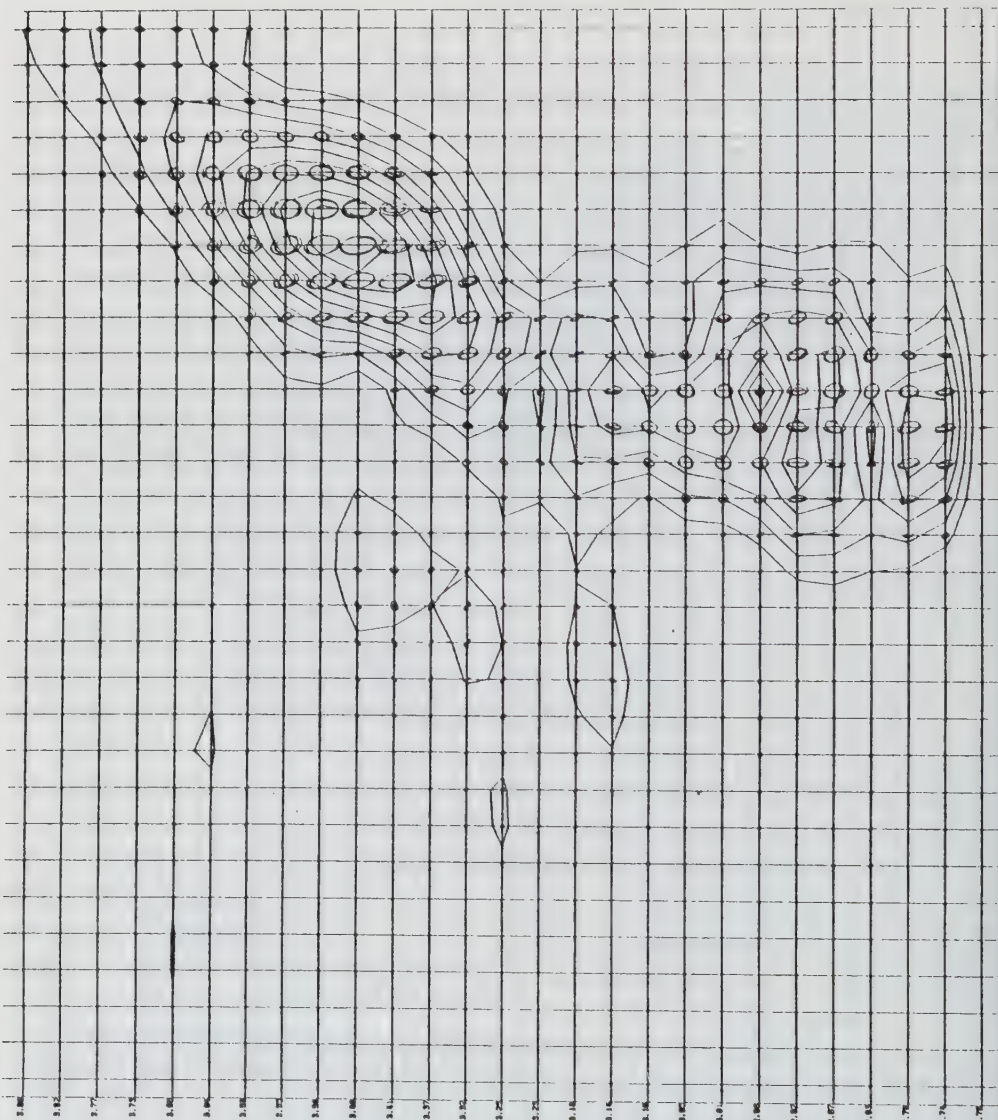
Polarisations-Dispersions-Matrix der Z- und R-Komponente
der Station B1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)



Polarisations-Dispersions-Matrix der Z- und R-Komponente
der Station C1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

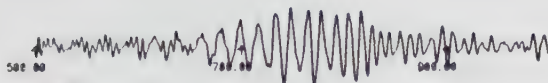
Vertikal-Achse : Periode (sec)

Island (1)

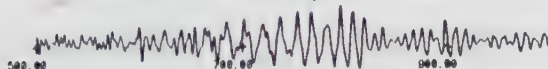
Auf allen drei Komponenten der A1 und C1 Station ist deutlich ein normal dispergierter Wellenzug zu erkennen, dessen langperiodischer Teil (ca. 25 sec) ein höherfrequenter Wellenzug (4-5 sec Periode) ohne deutliche Dispersion überlagert ist. Eine Airy-Phase wird nicht beobachtet, hingegen deutet ein Amplitudenminimum, das bei der Station A1 bei der Zeitmarke 800 liegt und sich bis Station B3 verfolgen läßt, auf eine Interferenz durch Wellenausbreitung über mehrfache Wege hin. In den PDNs der H-Komponenten ist die Polarisationsrichtung der R0-Mode erst bei Perioden $\gg 20$ sec einheitlich ca. 60 grd W. Die rasche Änderung der Polarisation sowohl an einer Station bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Perioden, als auch zwischen den Stationen A1 und C1 bei kleinen Perioden, weist auf eine der R0-Phase überlagerte Welle hin, die eine ähnliche Gruppengeschwindigkeits-Dispersion aufweist wie diese, so daß sie in der Dispersionsanalyse nicht zu trennen sind, aufgrund unterschiedlicher Phasengeschwindigkeits-Dispersion jedoch in der PA als kontaminierter Wellenzug in Erscheinung tritt. Insbesondere bei der Station A1 scheint ein zweiter Dispersionsast bei Perioden zwischen 9.5 und 14 sec und Geschwindigkeiten zwischen 2.7 und 3.1 km/sec zu liegen, dessen Polarisation auf eine Love-Welle schließen läßt. In dem Amplitudenminimum der Gabor-Matrix für die Station A1 bei 11.2 sec und der Geschwindigkeit 2.42 km/sec zeigt sich der schon im Zeitbereich beobachtbare Schwebungseffekt, der durch Wellenausbreitung über mehrfache Wege entstanden ist. Dies bestätigt die wkA, die zwei deutliche Maxima mit den Azimuten 7 grd W und 65 grd W aufweist. Bei Perioden $\gg 19$ sec ergibt die wkA Azimute zwischen 20 und 30 grd W. Zu geringeren Perioden verschiebt sich die Einfallrichtung weiter nach Norden, bis nach dem Interferenzminimum Azimute zwischen 50 und 60 grd W berechnet werden. Extrapoliert man den Verlauf des Azimuts hin zu längeren Perioden, dann wird das geographische Azimut (ca. 34 grd W) erst bei Perioden $\gg 30$ sec erreicht. Mittelt man die Azimute im Periodenbereich 8 - 16 sec, so ergibt sich in etwa das geographische Azimut. Die Folgerung liegt nahe, daß es sich zumindest in diesem Periodenbereich um zwei sich überlagernde Wellen handelt, die die wkA jedoch nur in einem Fall als solche erkennt. Die Drehung der Horizontalkomponenten in R- und T-Komponente bewirkt im Zeitbereich wegen der ständig sich verändernden Phasenbeziehung keine deutliche Trennung der Wellenanteile. Aus den PDNs der R- und Z-Komponenten ist ersichtlich, daß die Schwingungsellipsen bei der Station A1 im Gegensatz zur Station C1 z.T. stark geneigt sind. Auffallend ist die gute Korrelation der Elliptizität zwischen den Stationen und das starke Oszillieren mit einem Trend zu höheren Elliptizitätswerten. In die Gabor-Matrix der A1-T-Komponente wurden wegen der Übersichtlichkeit die oberen 5 Niveaulinien nicht eingezeichnet. Bei der Modellrechnung befriedigt das Modell die Dispersion der Rayleigh-Welle hinreichend, läßt jedoch keine

Interpretation der Gabormatrix der T-Komponente zu. Die zum Modell gehörenden theoretischen Elliptizitätswerte verlaufen im Gegensatz zu den Meßwerten sehr glatt und bestätigen bei großzügiger Betrachtung den Trend der Meßwerte zu höheren Elliptizitäten bei zunehmender Periode.

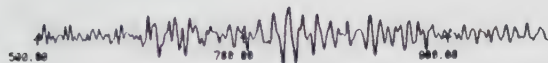
A1Z



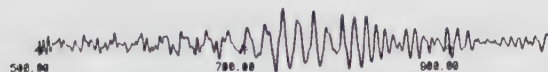
H



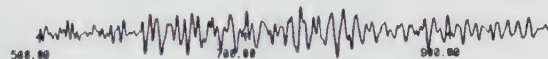
E



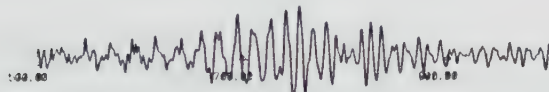
R



T



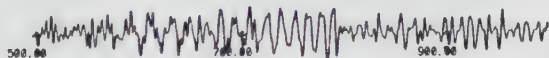
C1Z



N



E



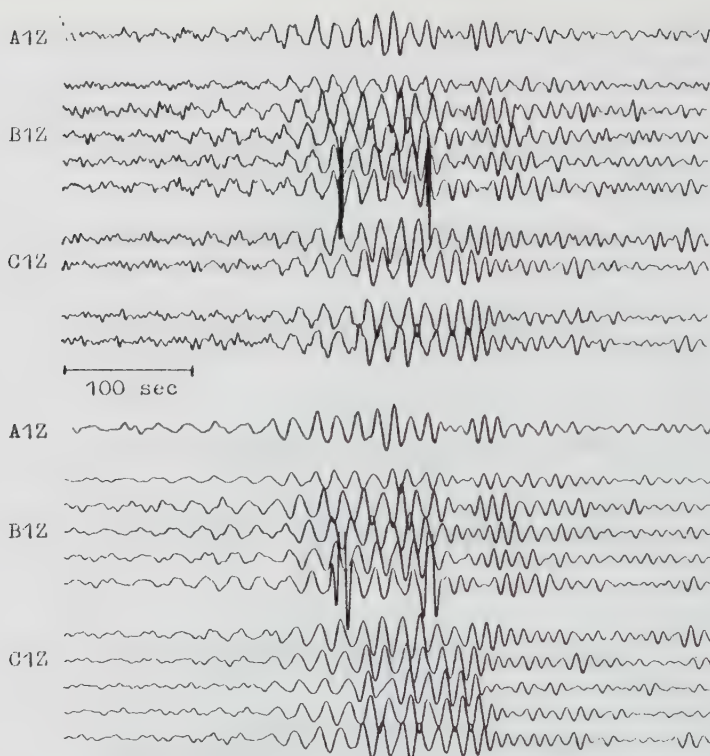
R



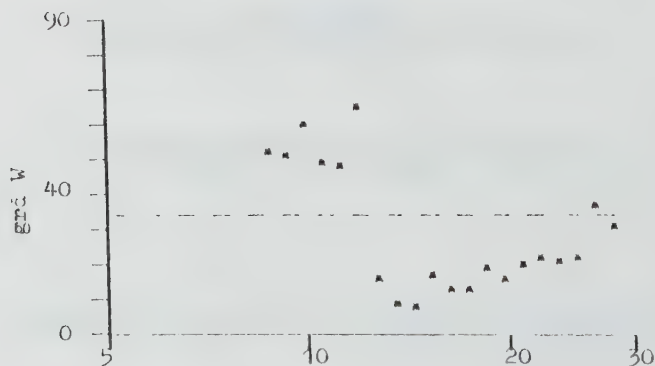
T



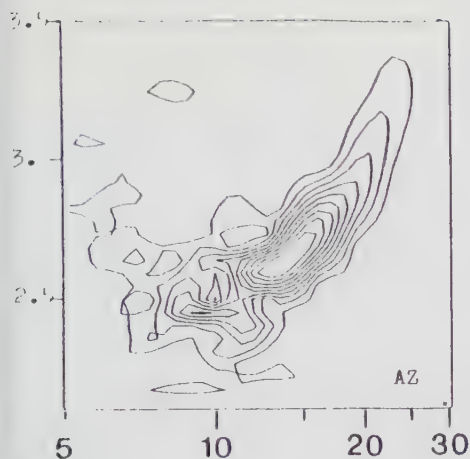
Vertikal-, NS-, EW-, Radial- und Transversal-Komponente
der Station A1, C1



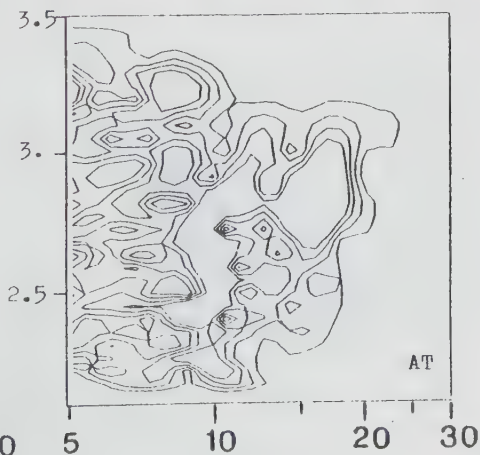
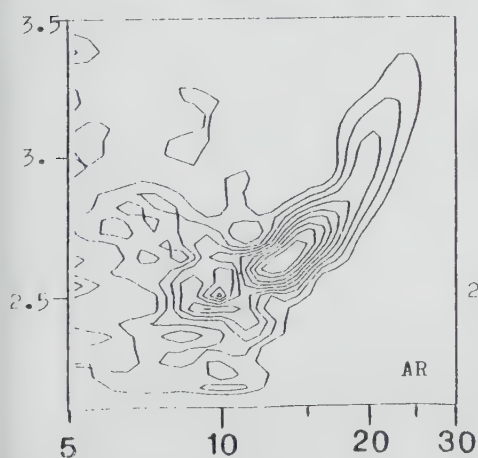
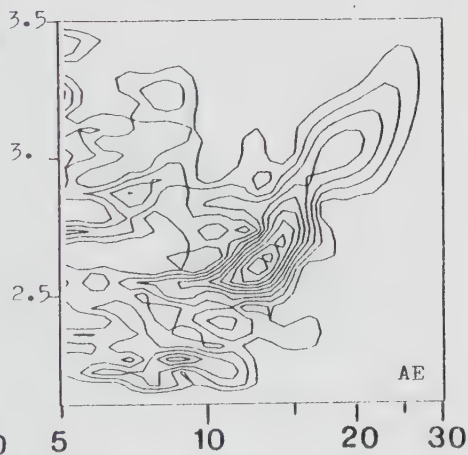
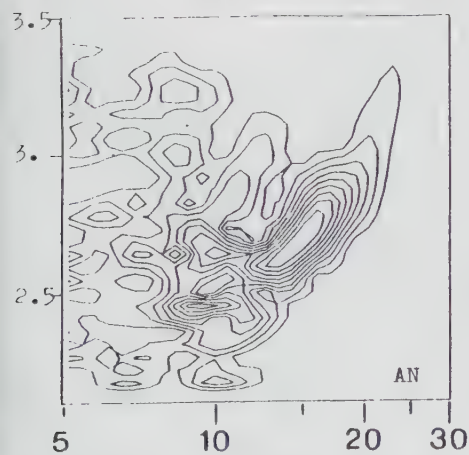
Vertikal-Komponenten der Stationen A1-C4 ,
10sec-TP-gefiltert (unten)

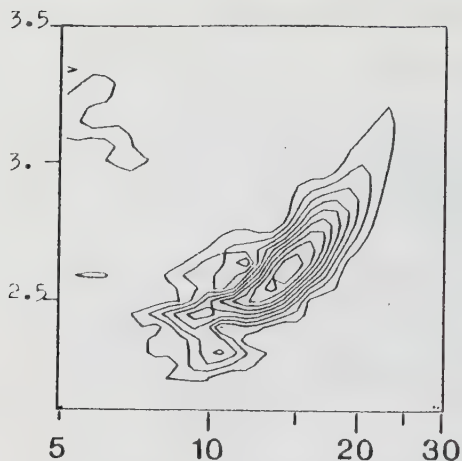


Ankunftsrichtung der RO-Mode in
Abhängigkeit von der Periode
gemäß der ω -k-Analyse

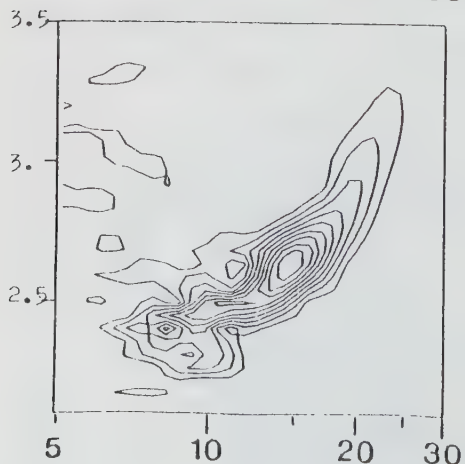
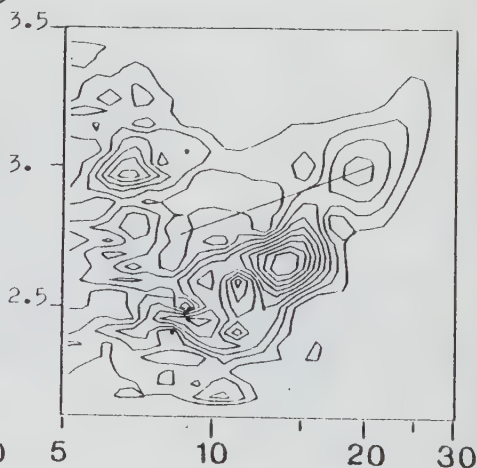
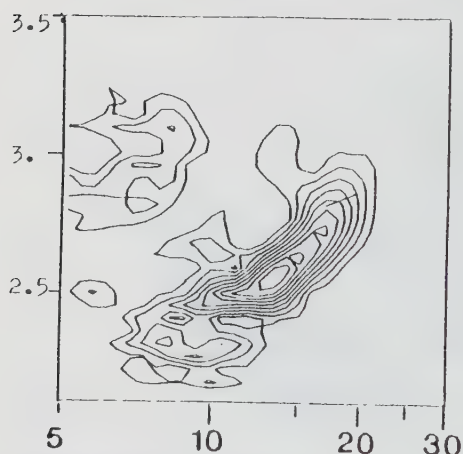


Gabor - Matritzen
der Station A1
horizontal : Periode (sec)
vertikal : Gruppengesch.
(km/sec)





Gabor - Matritzen
der Station C1
horizontal : Periode (sec)
vertikal : Gruppengesch.
(km/sec)



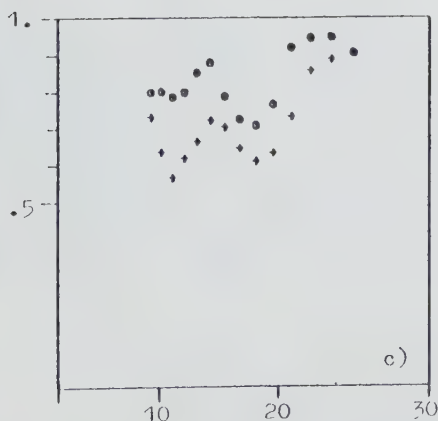
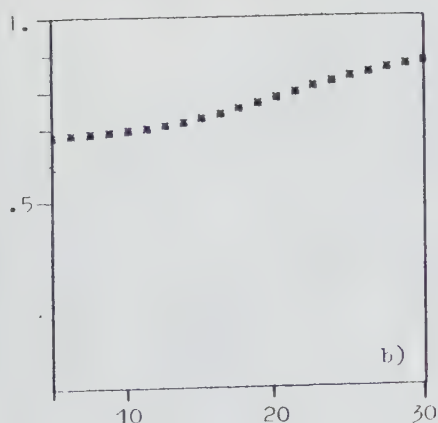
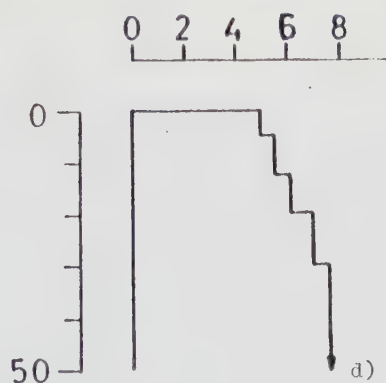
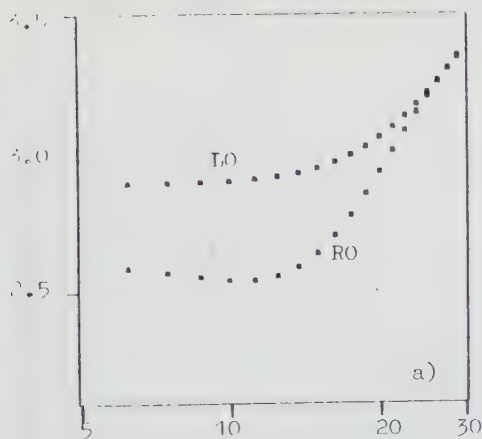
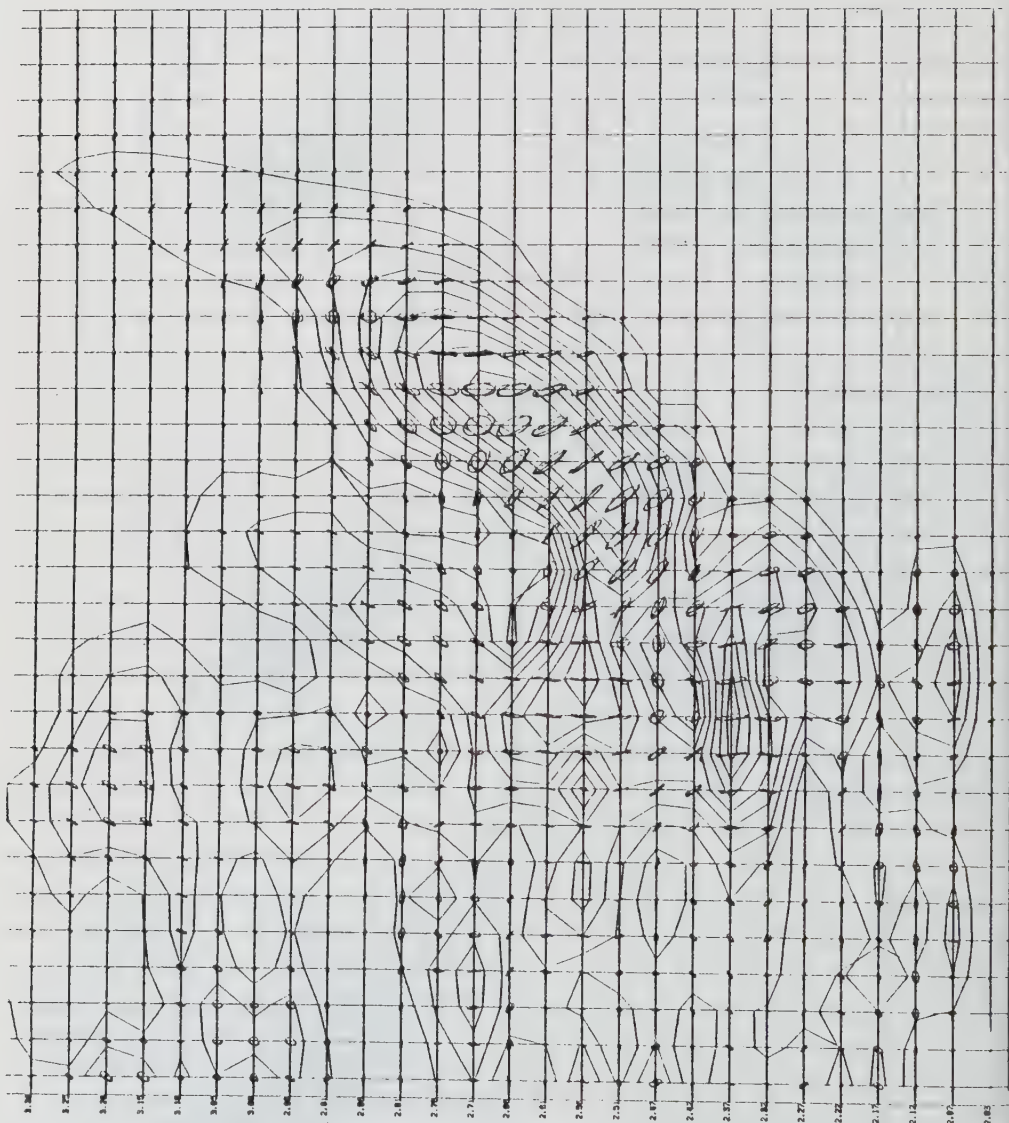


Abb. a) Theoretische Gruppengesch.-
Dispersion
horizontal : Periode (sec)
vertikal : v_g (km/sec)

Abb. b) und c)
Theoretische und gemessene
Elliptizitäten in Abhängig-
keit von der Periode
 $\odot \hat{=} A1$, $+\hat{=} C1$

Abb. d) den theoretischen Kurven
zugrundeliegendes Geschwin-
digkeits-Tiefen-Modell.
Falls nicht anders vermerkt,
gilt $v_s = 1/\sqrt{3} v_p$



Polarisations-Dispersions-Matrix der Horizontal-Komponenten
der Station A1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

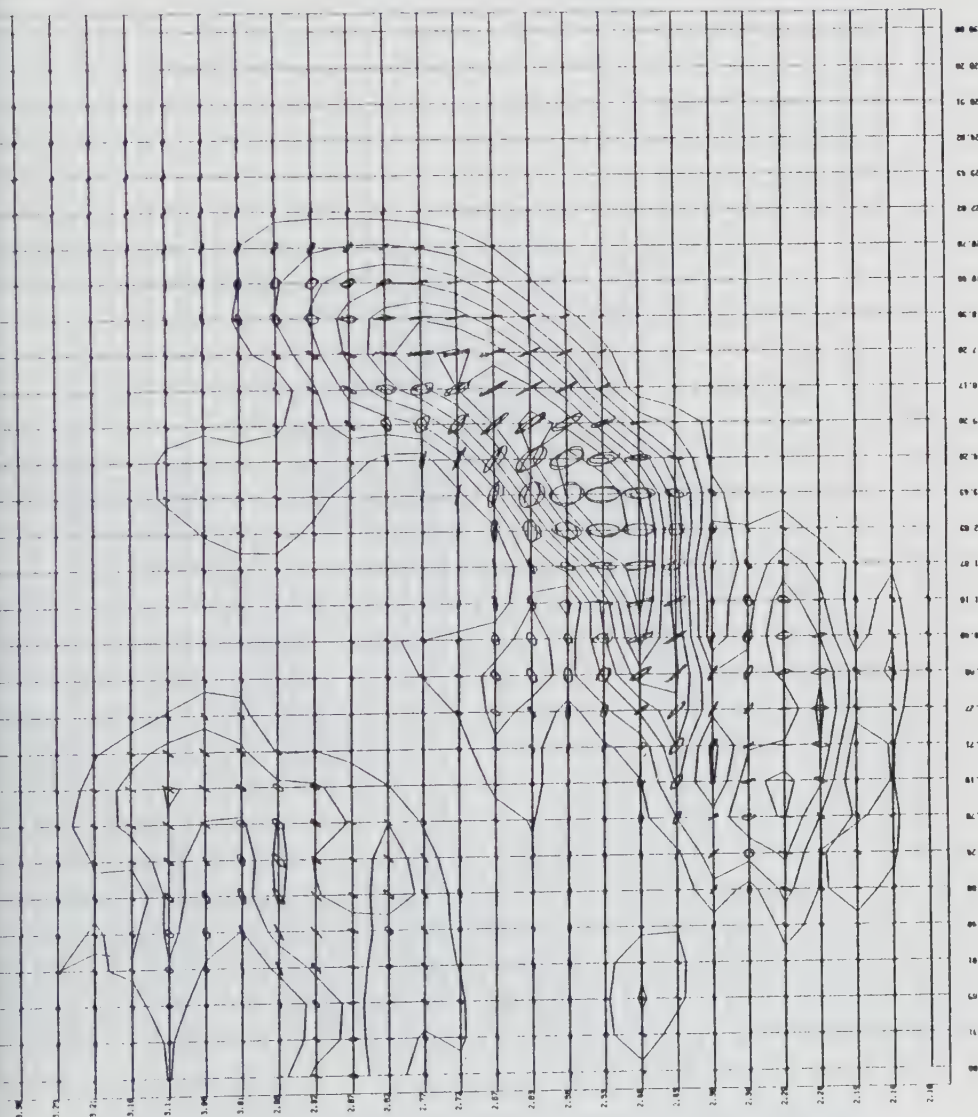
Vertikal-Achse : Periode (sec)

Island (1)

12.8.80

12:11:43.0

64.69 N 17.33 W



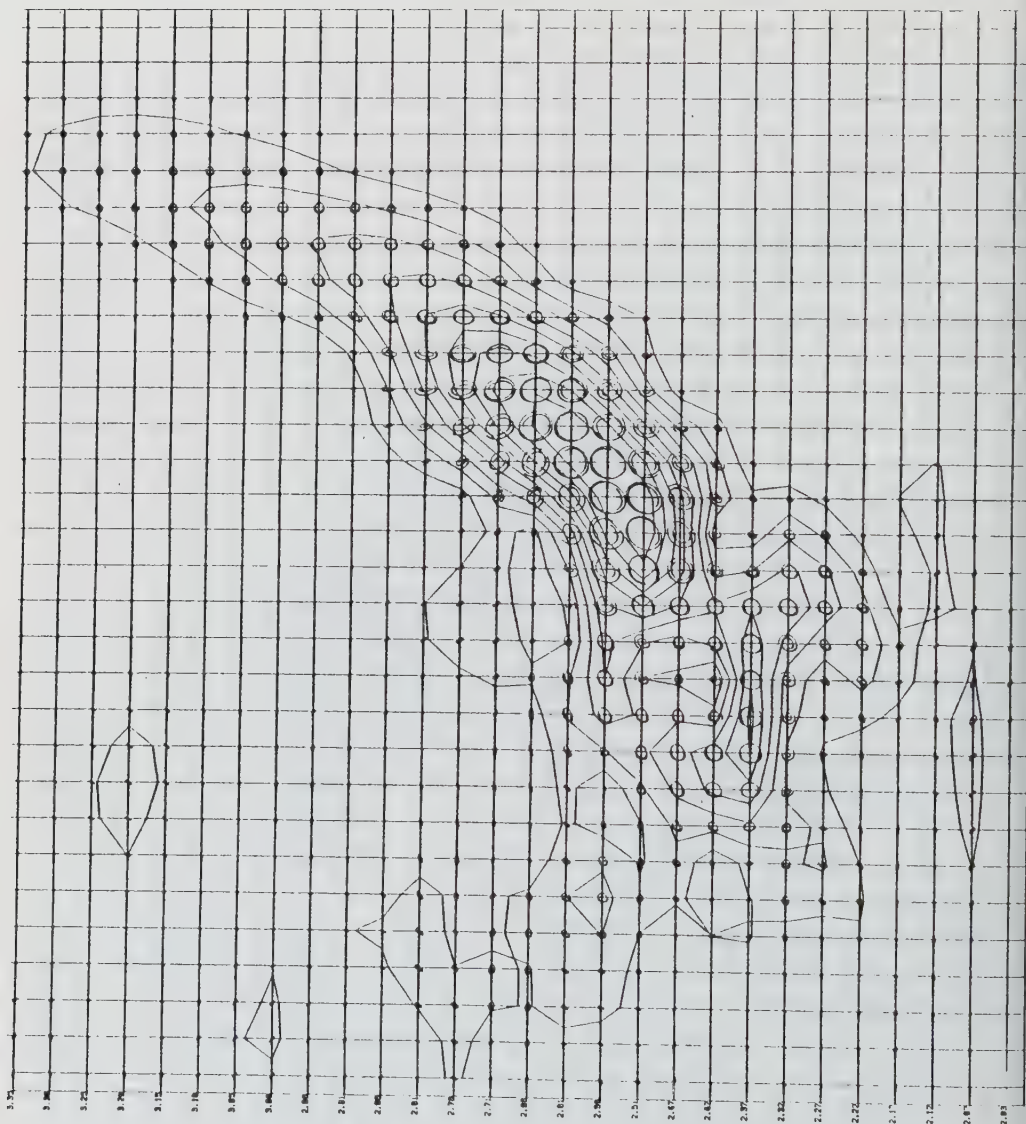
Polarisations-Dispersions-Matrix der Horizontal-Komponenten
der Station C1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)



Polarisations-Dispersions-Matrix der Z- und R-Komponente
der Station A1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

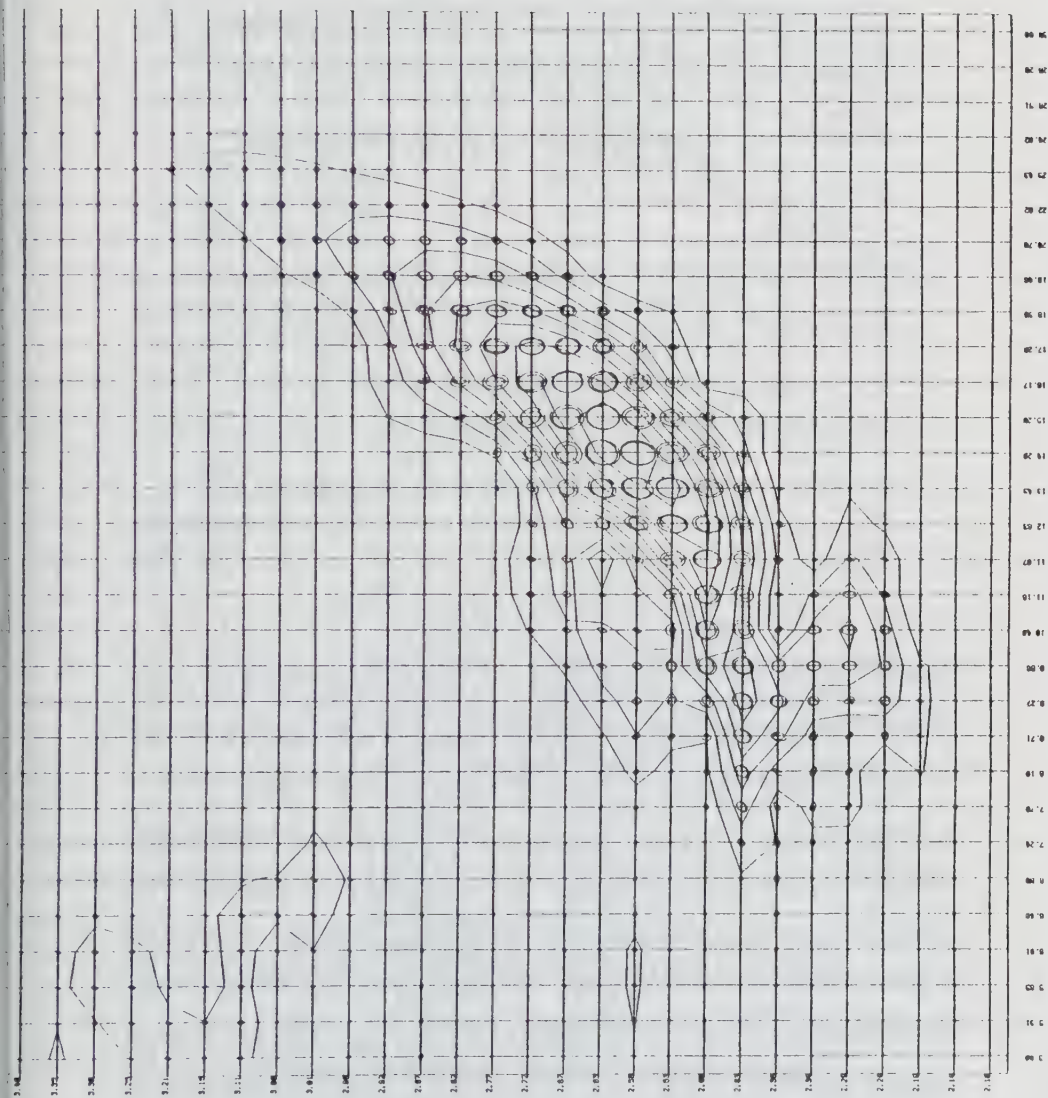
Vertikal-Achse : Periode (sec)

Island (1)

12.8.80

12:11:43.0

64.69 N 17.33 W



Polarisations-Dispersions-Matrix der Z- und R-Komponente
der Station C1

Orientierung der Hodographen :

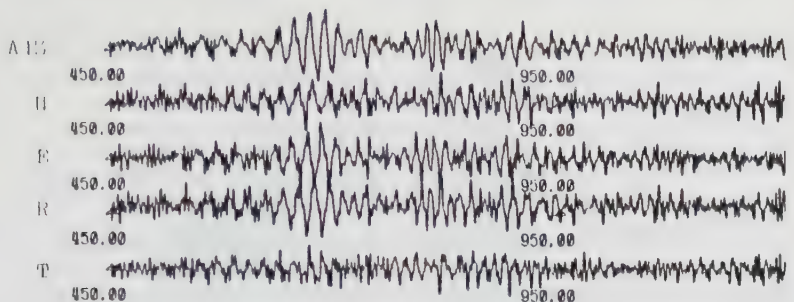


Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

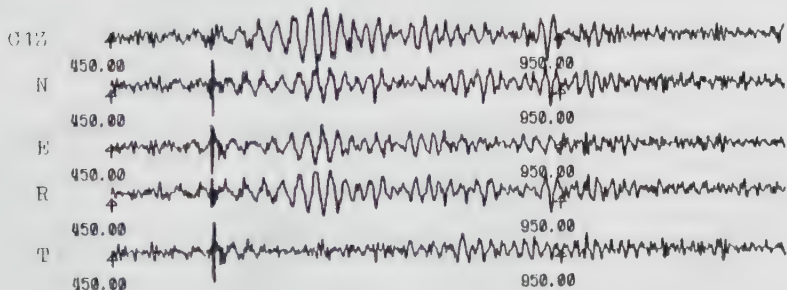
Vertikal-Achse : Periode (sec)

Island (2)

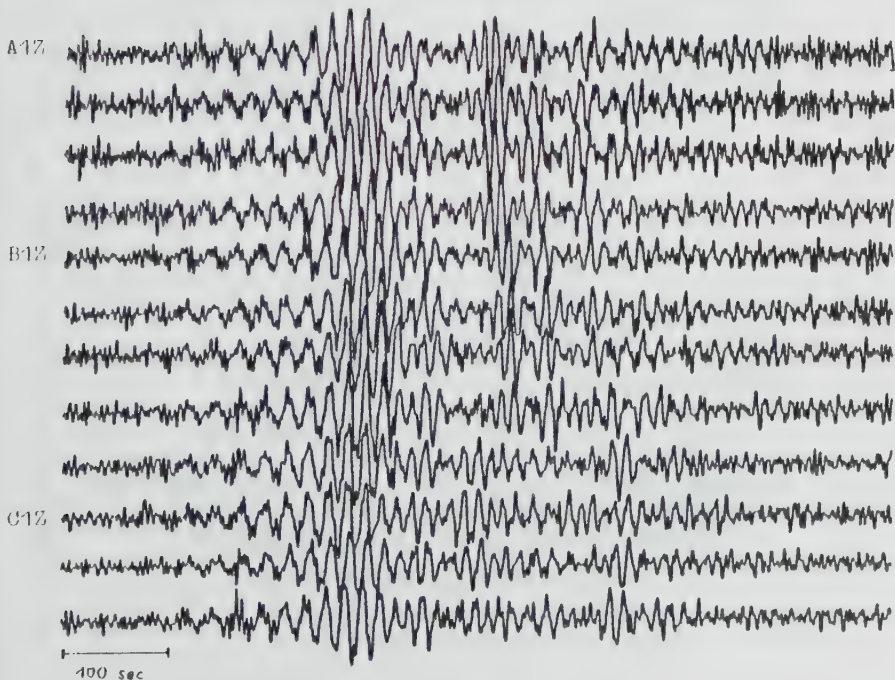
Der prägnanteste Wellenzug der beiden vorhandenen 3K-Registrierungen des Ereignisses etwa bei Zeitmarke 650 hat in allen Komponenten Amplituden, die deutlich über dem kurzperiodischen Noise liegen. Die Vermutung drängt sich auf, daß es sich um die Airy-Phase der R0-Mode handelt. Kurz nach der Zeitmarke 560 ist im C-Subarray ein lokales hochfrequentes Ereignis zu beobachten. In der Coda der R0-Mode sind einige weitere Wellengruppen mit ca. 11 sec Periode, die nach einer TP-Filterung und insbesondere in der Zusammenschau aller Stationen besser zu beobachten sind. In den PDMS der H-Komponenten fällt zunächst auf, daß die vermeintliche Airy-Phase nicht mit einem Minimum der Gruppengeschwindigkeit zusammenfällt, sondern lediglich durch ein Abflachen der Dispersionskurve bewirkt wird. Eine mögliche Erklärung für dieses Phänomen kann die Ausbreitung über deutlich verschiedene Krusten-Mantel-Strukturen sein, wobei bei der Ausbreitung im zweiten Wegstück die Airy-Phase des ersten Wegstücks weiter dispergiert wird, andererseits aber die Perioden, die zur Airy-Phase des zweiten Wegstücks gehören, wesentlich stärker gebündelt sich weiterausbreiten, als im ersten Wegstück. Die Polarisation der H-Komponenten ist im Bereich des Dispersionsasts der R0-Mode zumindest bei der C1-Station nahezu linear und weist ein Azimut von ca. 48 grd W aus. Bei Perioden ab ca. 15 sec und etwas größeren Geschwindigkeiten als die der R0-Mode, ist bei kleinen Amplituden eine Polarisation zu beobachten, die einer Love-Mode zugeordnet werden muß. Auch im noch mitanalysierten langperiodischen Anteil der Coda ist eine lineare Polarisation mit etwa gleichem Azimut wie die von der R0-Phase verursachte zu erkennen. Obgleich man in der Montage aller GRF-Registrierungen bei den Subarrays A und B zwischen den Zeitmarken 800 und 900 zwei Wellengruppen beobachten kann, scheint dies aufgrund der DA als Interferenzeffekt interpretiert werden zu müssen, wobei der erste Wellenzug, beginnend bei der Zeitmarke 800 mit ca. 10 sec Periode, mit einem zweiten Wellenzug überlagert ist, der bei der Zeitmarke 900 eine Periode von ca. 15 sec aufweist. Interessant ist, daß das C-Subarray zwar die letztere Wellengruppe ebenso kohärent wiedergibt, wie das restliche Array, die erste Wellengruppe jedoch im Vergleich deutlich früher erscheint. Die wKA zeigt für Perioden < 17 sec Azimute im Bereich von ca. 60-70 grd W; bei Perioden > 17 sec ist die Streuung gering und das mittlere Azimut ist etwas größer als das geographische (ca. 42 grd W). Die wKA ergibt keine Hinweise auf eine Überlagerung von Wellen. Das Ergebnis der wKA der Coda-Wellengruppe zwischen den Zeitmarken 850 und 950 ist, daß der größte Energieanteil dieser Gruppe aus einem Azimut von ca. 20 grd W kommt. Nach der Koordinatendrehung um 45 grd erscheinen die R- und T-Komponenten gut entkoppelt, bei der A1-Station etwas weniger deutlich, was auch durch den höheren Noise-Pegel bedingt ist. Die in den PDMS der Z- und R-Komponenten zu beobachtenden Schwingungsellipsen zeigen besonders bei der C1-Station geringe Neigungswinkel gegen die Vertikale. Der Verlauf der Elliptizität mit der Periode ist bei beiden Stationen recht glatt, jedoch ist die Ähnlichkeit beider Kurven nicht sehr groß.

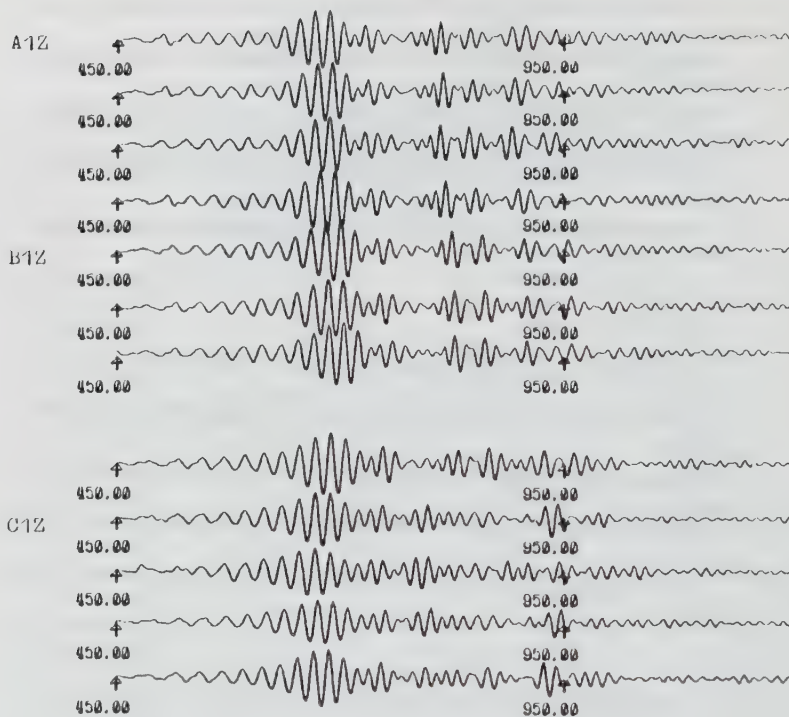


Vertikal-, NS-, EW-, Radial- und Transversal-Komponente
der Station A1, C1

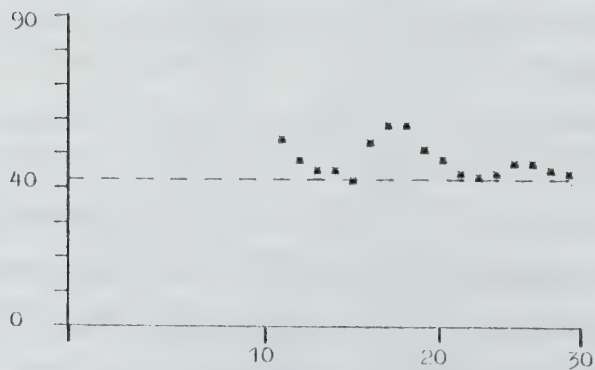


Vertikal-Komponenten der Stationen A1-C3

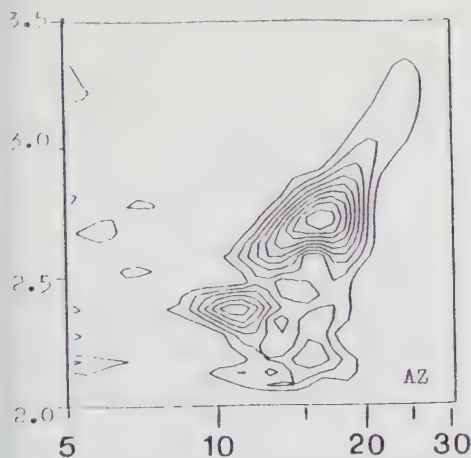




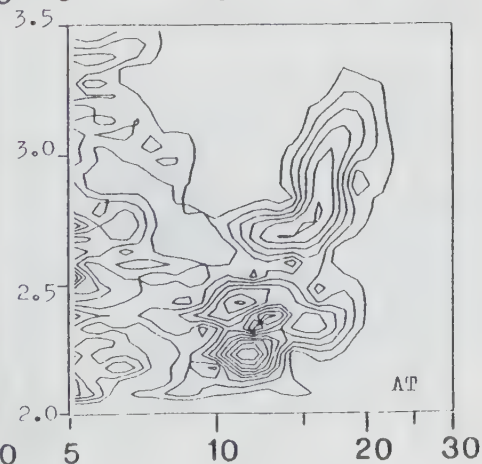
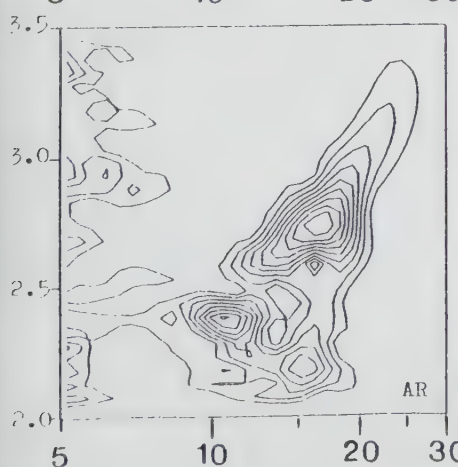
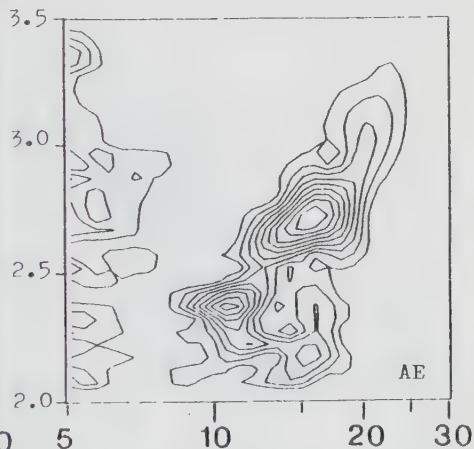
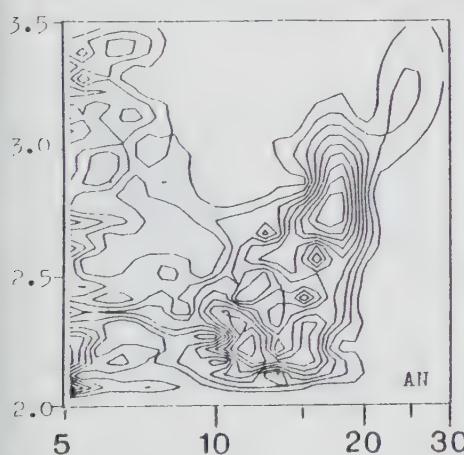
Vertikal-Komponenten der Stationen A1-C4
10sec-TP-gefiltert

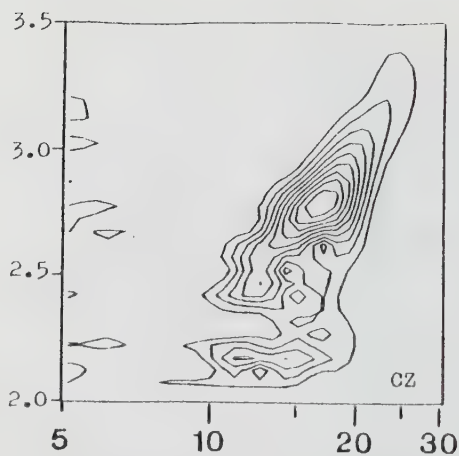


Ankunftsrichtung der R0-Mode in
Abhängigkeit von der Periode
gemäß der ω -k-Analyse

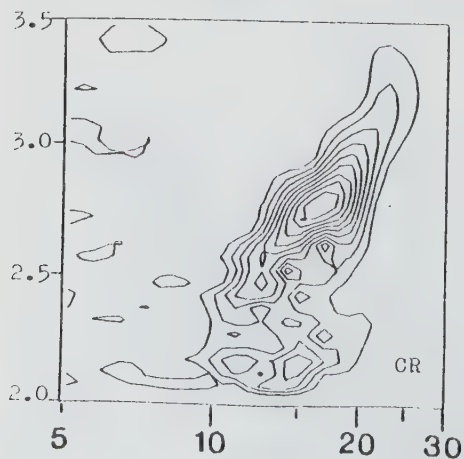
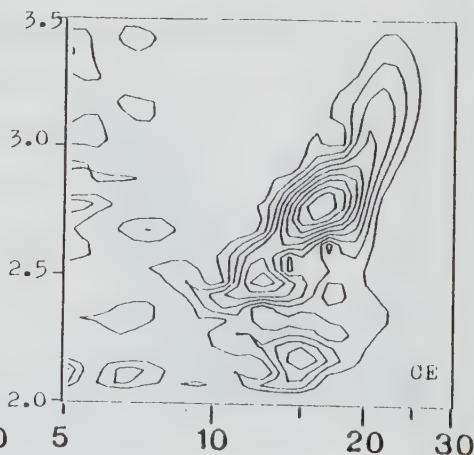
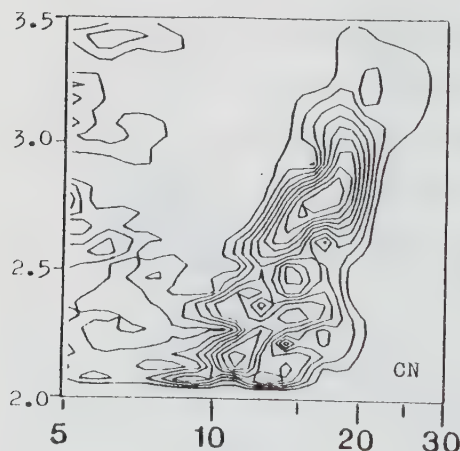


Gabor - Matritzen
der Station A1
horizontal : Periode (sec)
vertikal : Gruppengesch.
(km/sec)





Gabor -Matritzen
der Station C1
horizontal : Periode (sec)
vertikal : Gruppengesch.
(km/sec)



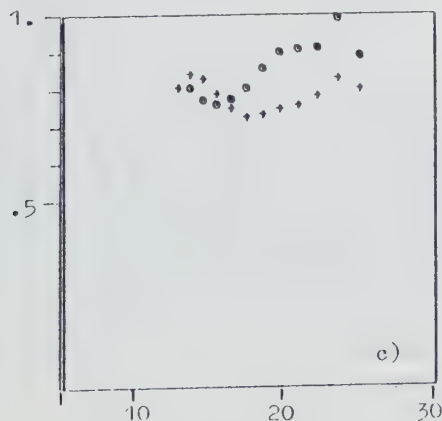
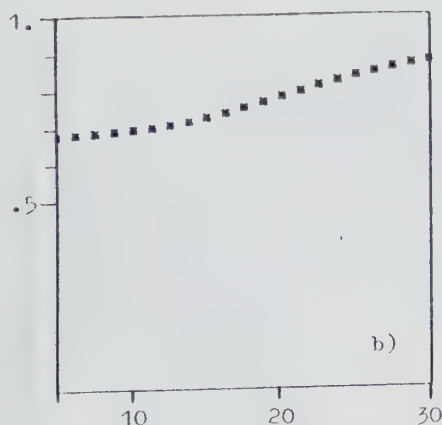
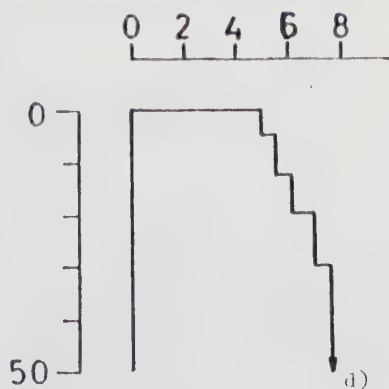
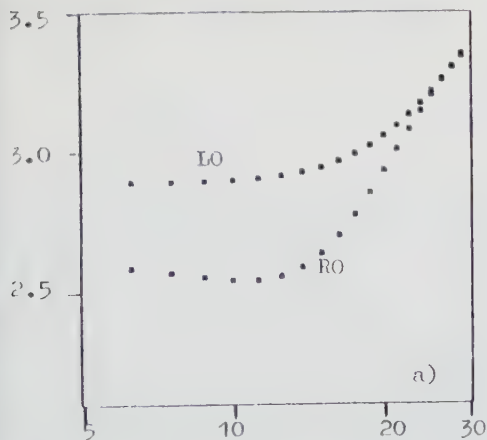


Abb. a) Theoretische Gruppengesch.-
Dispersion
horizontal : Periode (sec)
vertikal : v_g (km/sec)

Abb. b) und c) $\vartheta \hat{=} A1$, $+ \hat{=} C1$
Theoretische und gemessene
Elliptizitäten in Abhängig-
keit von der Periode

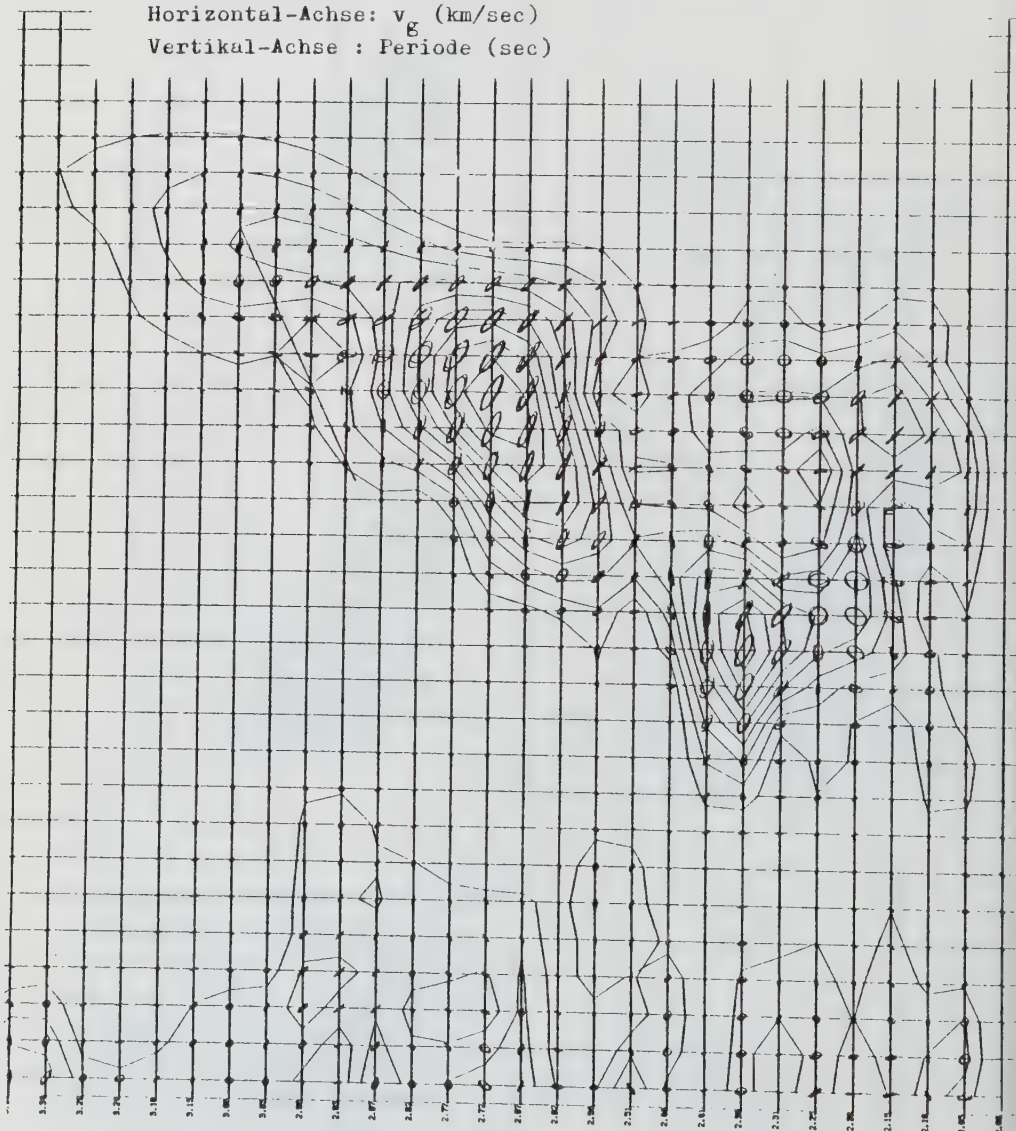
Abb. d) den theoretischen Kurven
zugrundeliegendes Geschwin-
digkeits-Tiefen-Modell.
Falls nicht anders vermerkt,
gilt $v_s = 1/\sqrt{3} v_p$

Polarisations-Dispersions-Matrix der Horizontal-Komponenten
der Station A1

Orientierung der Hodographen :

Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)



Island (2)

20.8.80

15:05:58.4

62.85 N 25.16 W

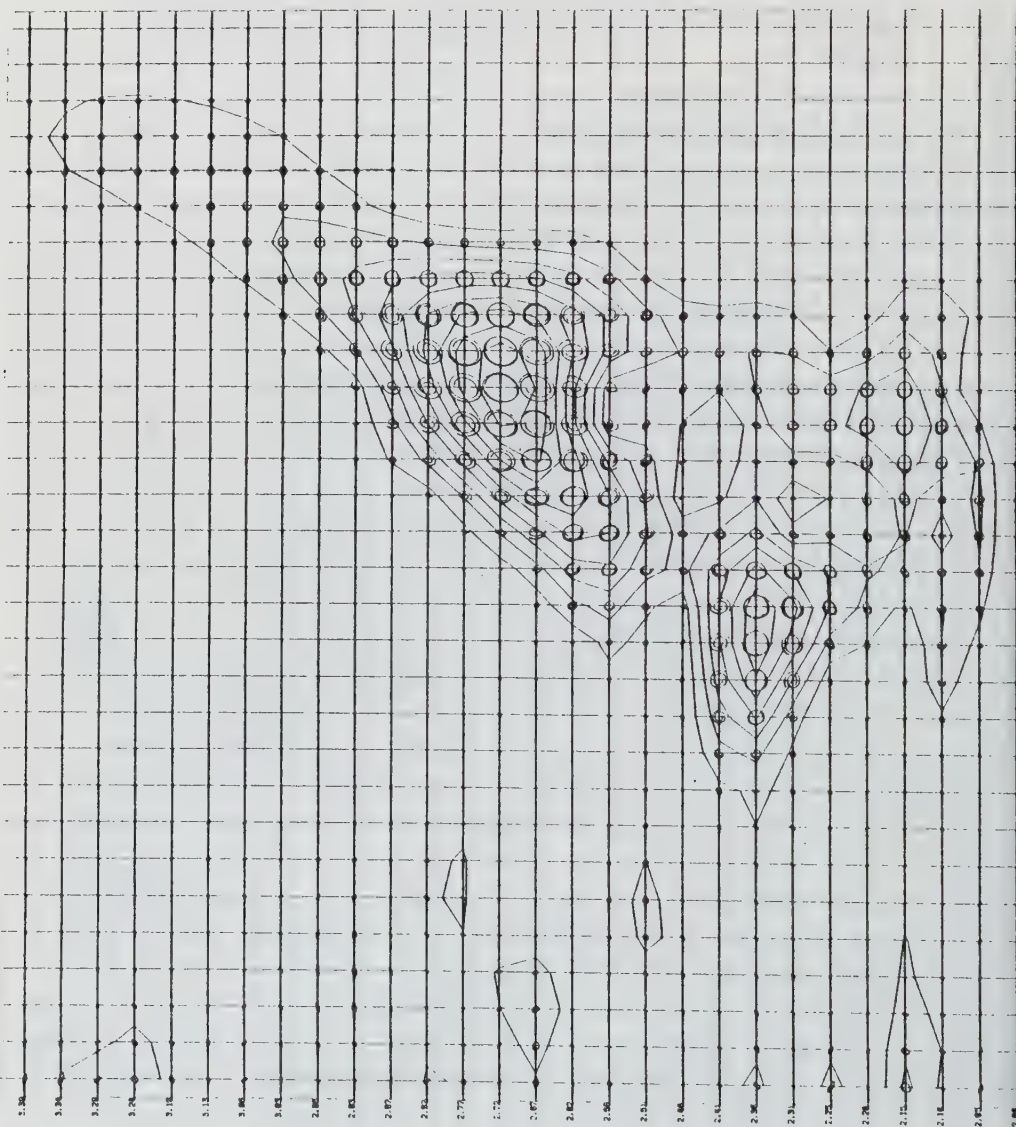
Polarisations-Dispersions-Matrix der Horizontal-Komponenten
der Station C1

Orientierung der Hodographen :

Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)





Polarisations-Dispersions-Matrix der Z- und R-Komponente
der Station A1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

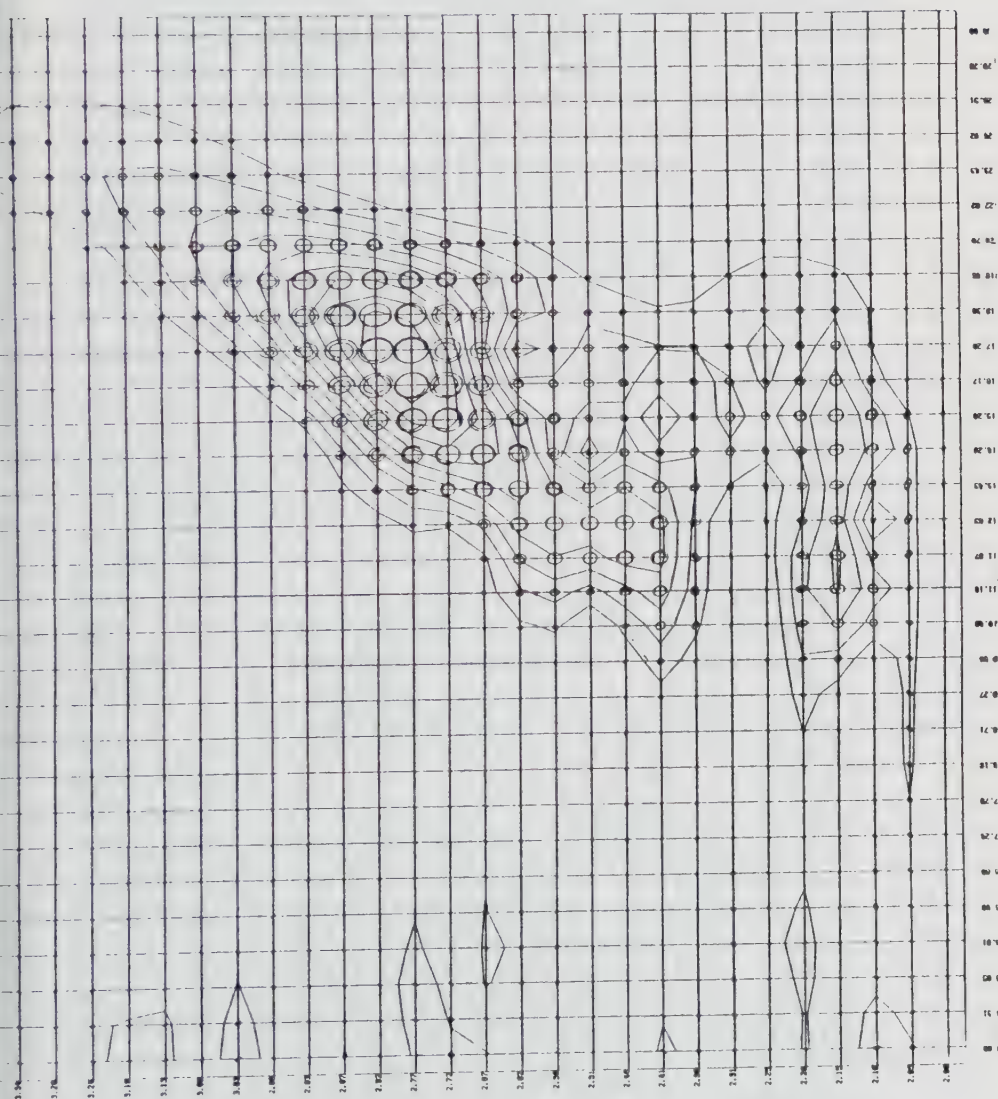
Vertikal-Achse : Periode (sec)

Island (2)

20.8.80

15:05:58.4

62.85 N 25.16 W



Polarisations-Dispersions-Matrix der Z- und R-Komponente
der Station C1

Orientierung der Hodographen :



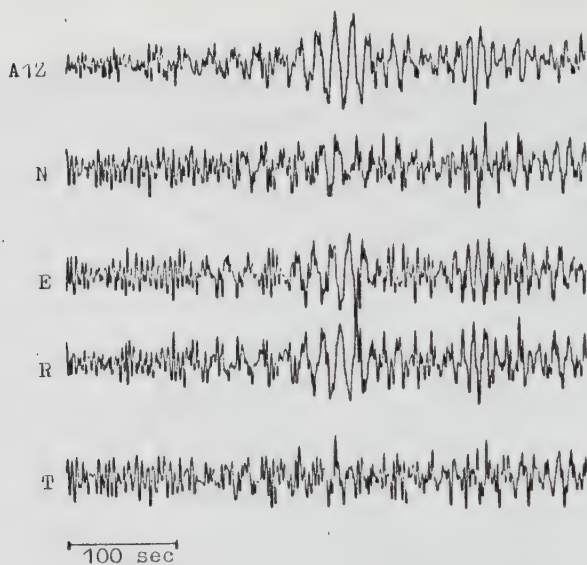
Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)

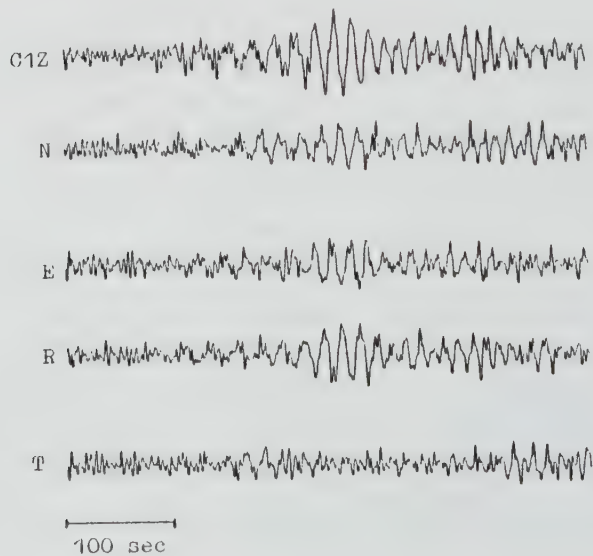
Island Region

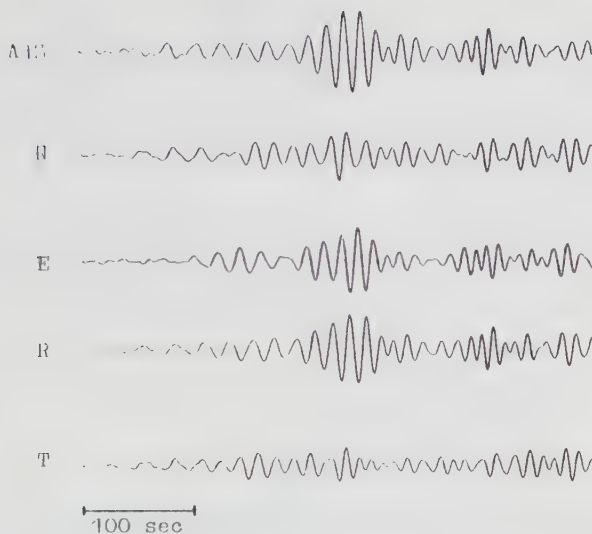
Das Epizentrum des Bebens stimmt nahezu mit dem des Island(2)-Bebens überein. In den 3K-Registrierungen ist zunächst nur eine Airy-Phase, deren Amplituden sich deutlich vom kurzperiodischen Noise herausheben, in der Mitte des Intervalls zu erkennen. Bei der Station C1 ist der kurzperiodische Noise etwas geringer wie bei der Station A1, sodaß hier auch noch ein langperiodischer Anteil der Oberflächenwellen vor der Airy-Phase beobachtet werden kann. Eine 10 - sec TP-Filterung bringt eine wesentliche Verbesserung des Signal- Noise- Verhältnisses. Bei der Station A1 treten in der Coda einige Wellengruppen auf, die bei der Station C1 nicht mit Sicherheit zu identifizieren sind. Die PDA der H-Komponenten zeigt, daß die Airy-Phase auch bei diesem Beben nur unter Vorbehalten einem Gruppengeschwindigkeits-Minimum zuzuordnen ist. Sehr ähnlich zum Island(2)-Beben ist auch die Polarisation der H-Komponenten, die im langperiodischen Bereich (> 23 sec) bei beiden Stationen linear ist, ebenso wie im Bereich maximaler Amplituden bei der Station C1. Dazu im Gegensatz sind die Schwingungsellipsen bei der Station A1 im Bereich maximaler Amplituden leicht geöffnet, mit einer Richtung der großen Halbachse von ca. 59 grd von N nach W, was etwas mehr ist, als die bei C1 abzulesende Richtung von ca. 51 grd. Auch die Polarisationsrichtung der Coda-Wellen, die bei beiden Stationen unterschiedliche Perioden und Geschwindigkeit haben, stimmt in etwa mit den vorherigen Richtungen überein. Fast im gesamten interessierenden Periodenbereich ist bei etwas höheren Geschwindigkeiten im Bereich der niedrigsten Isolinie ein transversaler Polarisationsanteil zu erkennen, der einer Love-Welle zugeordnet werden muß. In der Montage aller GKF-Registrierungen sind in der Coda, wie auch beim Island(2)-Beben, im A- und B-Subarray zwei relativ nahe zusammenliegende Wellengruppen zu beobachten, im C-Subarray jedoch nur ein längerer Wellenzug mit höherer Geschwindigkeit. Die wkA ergibt im Periodenbereich zwischen 12 und 18 sec Azimute zwischen 43 und 60 grd W, bei größeren Perioden, von einem Ausreißer abgesehen, recht konstante Azimute die gut mit dem geographischen übereinstimmen. Die Drehung in R- und T-Komponenten ergibt eine gute Trennung der longitudinal und transversal polarisierten Wellen, wobei in der T-Komponente keine deutliche Dispersion oder eine Airy-Phase zu beobachten ist. Die PDA der R- und Z-Komponenten zeigt Schwingungsellipsen, deren große Halbachsen i.A. weniger als 10 grd gegen die Vertikale geneigt sind, ausgenommen bei der Station A1, wo die Ellipsen im Periodenbereich von ca. 20-23 sec "flach liegen". Die Elliptizität zeigt für die Station C1 einen recht glatten Verlauf, der dem des Island(2)-Bebens an der gleichen Station sehr ähnelt. Die plötzliche Änderung der Elliptizität der A1-Station zu geringeren Werten bei den Perioden ist auf das "flachliegen" der Ellipsen in diesem Bereich zurückzuführen. Dies beeinträchtigt auch die Ähnlichkeit mit der entsprechenden Kurve für das

Island(2)-Beben. Bei der Modellrechnung läßt sich die Dispersion der R0- Mode leidlich gut durch das Modell anpassen; die Anpassung der zum gleichen Modell berechneten L0-Mode ist nicht so gut, wobei allerdings auch die geringe Ähnlichkeit der Gabor-Matrizen der A1- T- und C1-T-Komponente zu beachten ist. Die gemessenen Elliptizitäten können durch die theoretischen nicht erklärt werden.

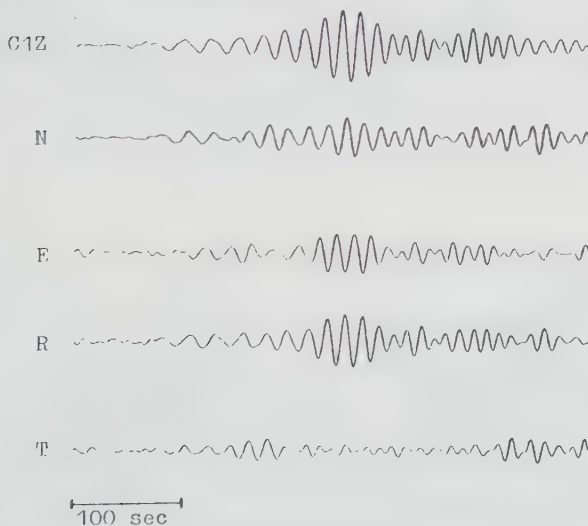


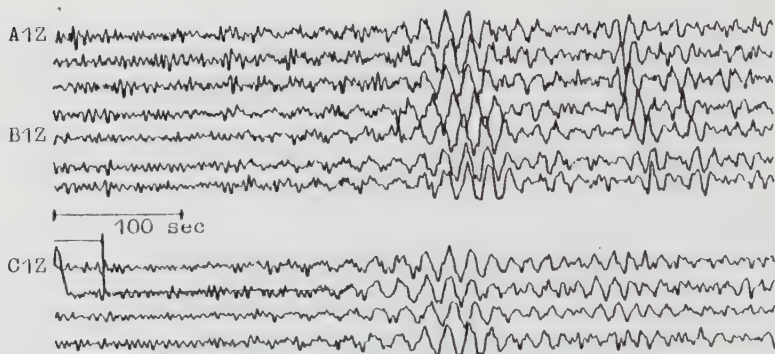
Vertikal-, NS-, EW-, Radial- und Transversal-Komponente
der Station A1, C1



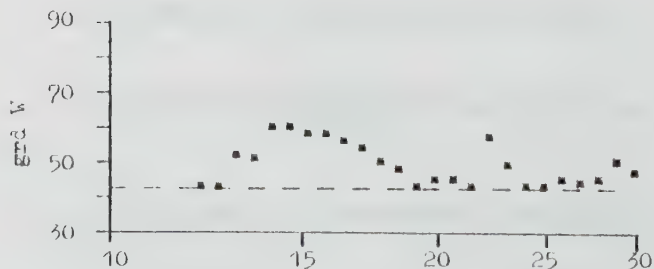
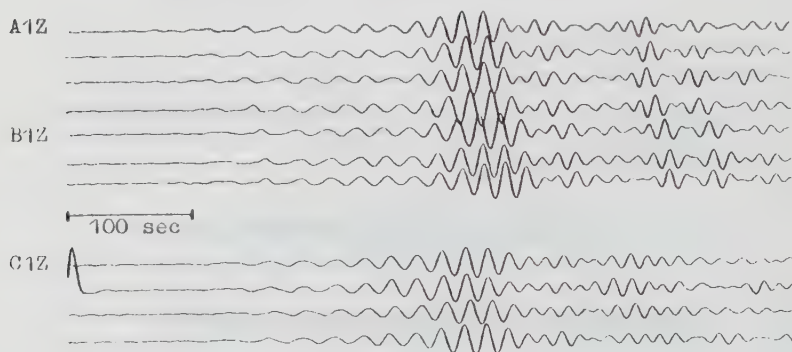


Vertikal-, NS-, EW-, Radial- und Transversal-Komponente
der Station A1, C1 10-sec-TP gefiltert



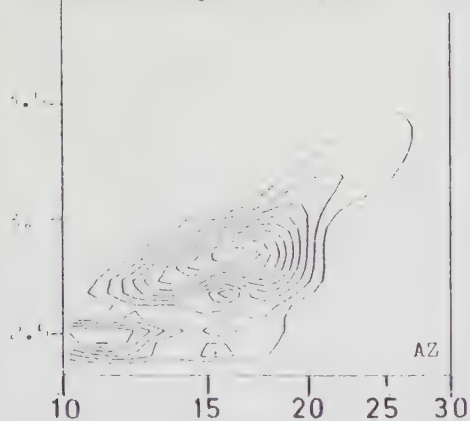


Vertikal-Komponenten der Stationen A1-C4 ,
10sec-TP-gefiltert (unten)

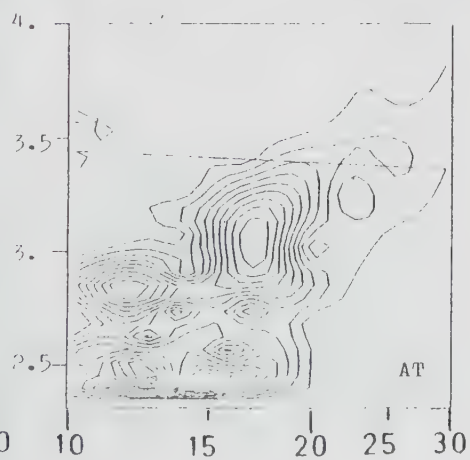
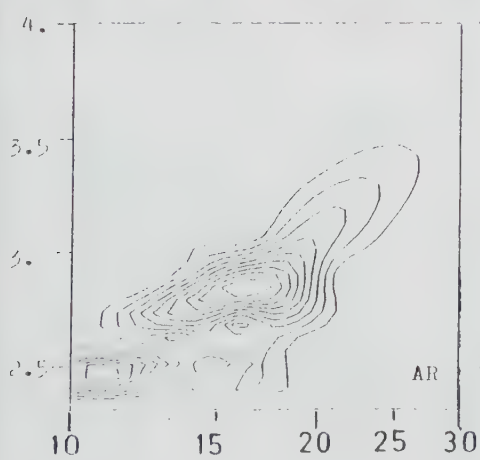
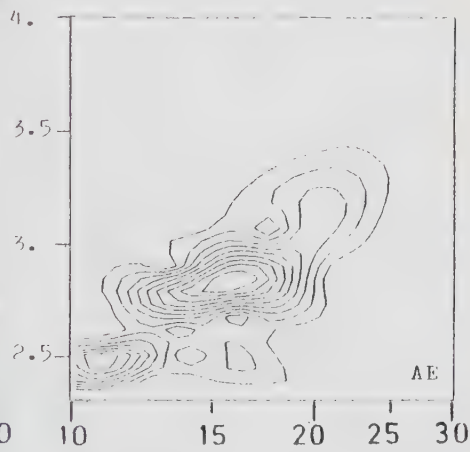
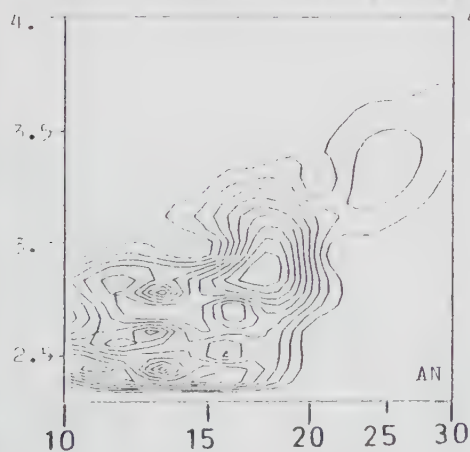


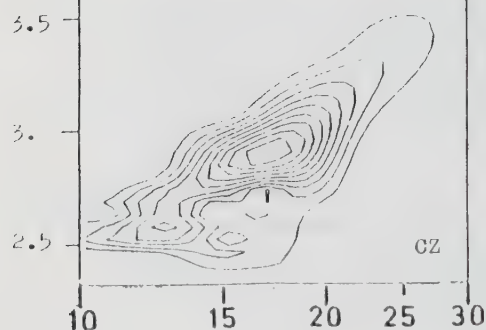
Ankunftsrichtung der RO-Mode in
Abhaengigkeit von der Periode
gemäß der ω -k-Analyse

Island Region 20.8.80 14:25:38.0 62.77 N 25.30 W

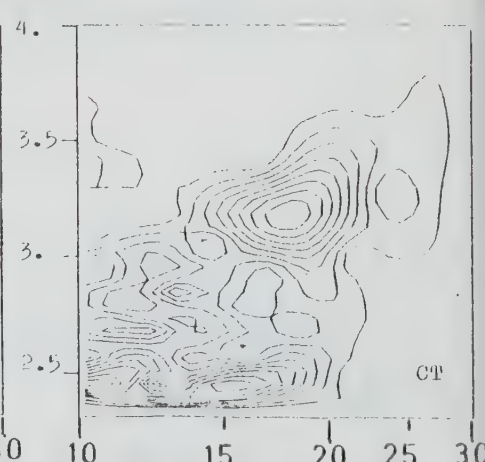
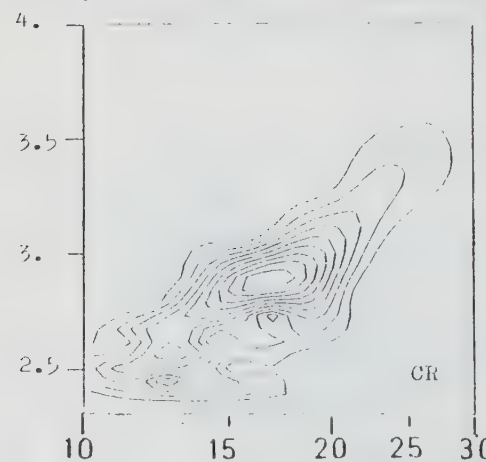
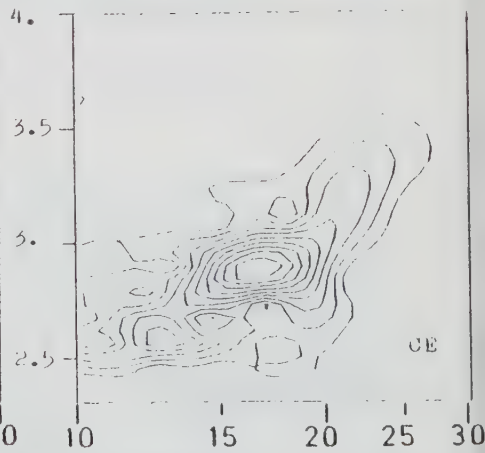
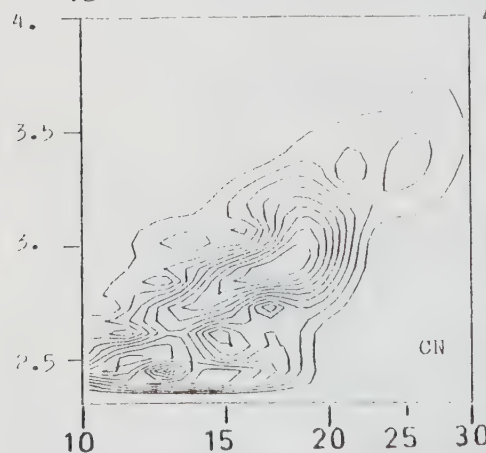


Gabor - Matrizen
der Station A1
horizontal : Periode (sec)
vertikal : Gruppengesch.
(km/sec)





Gabor -Matritzen
der Station C1
horizontal : Periode (sec)
vertikal : Gruppengesch.
(km/sec)



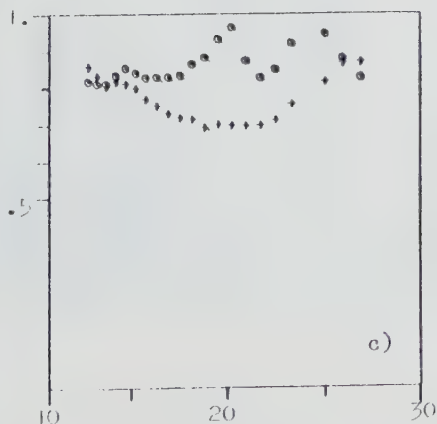
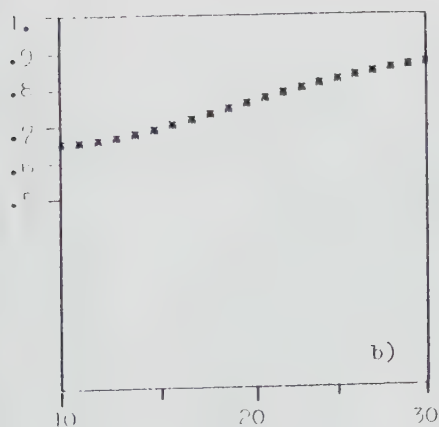
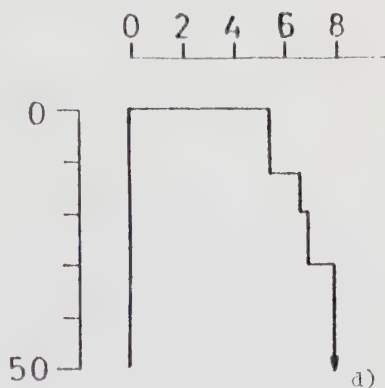
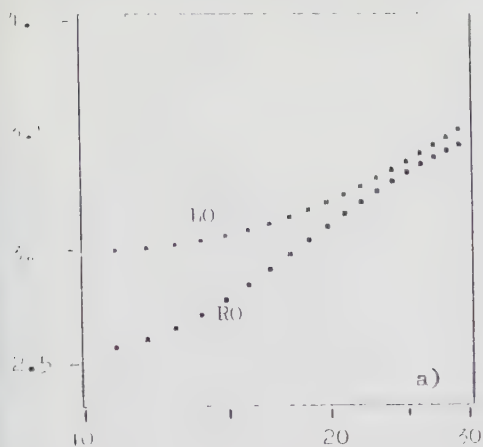


Abb. a) Theoretische Gruppengesch.-Dispersion
horizontal : Periode (sec)
vertikal : v_g (km/sec)

Abb. b) und c) Theoretische und gemessene Elliptizitäten in Abhängigkeit von der Periode
 $\ominus \hat{=} A1$, $+$ $\hat{=} C1$

Abb. d) den theoretischen Kurven zugrundeliegendes Geschwindigkeits-Tiefen-Modell.
Falls nicht anders vermerkt, gilt $v_s = 1/\sqrt{3} v_p$

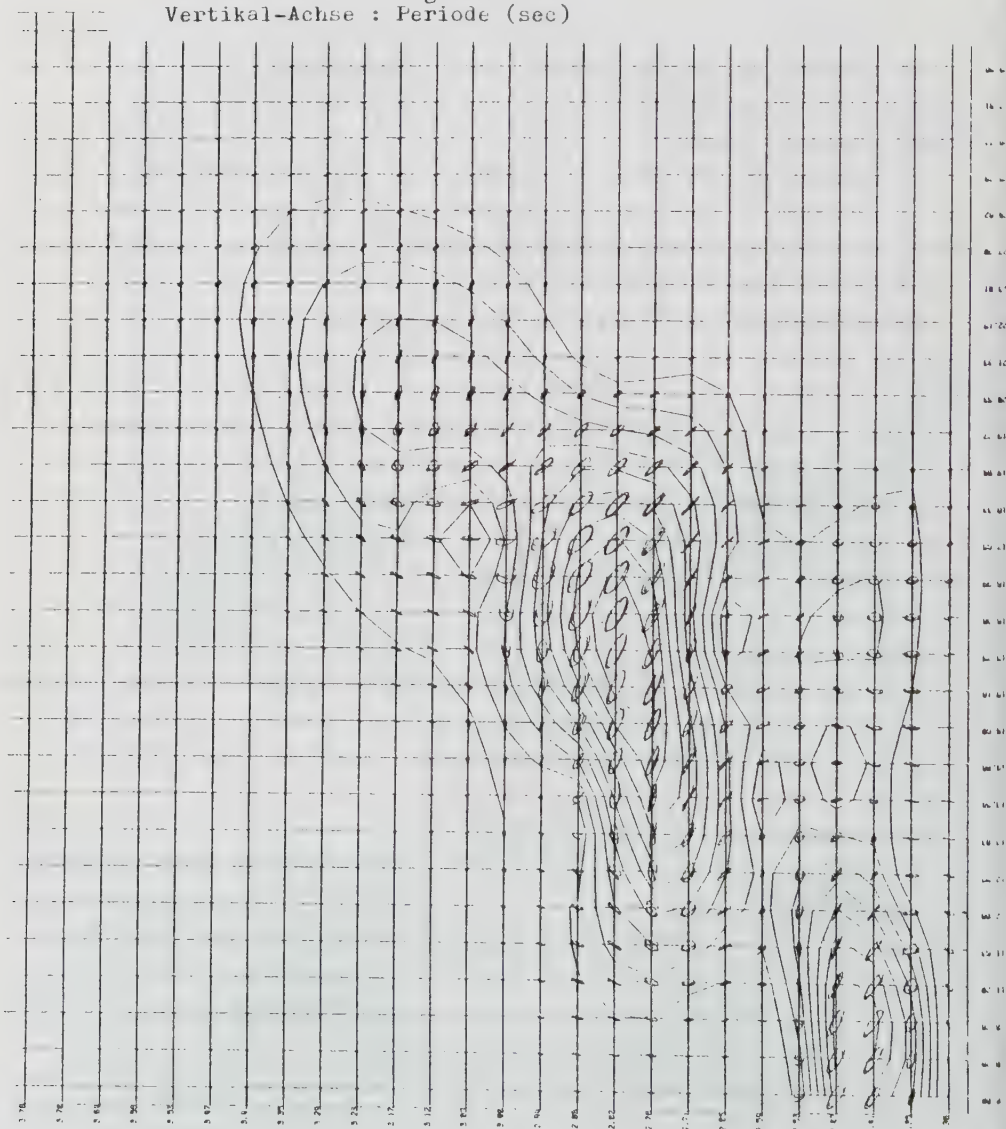
Polarisations-Dispersions-Matrix der Horizontal-Komponenten
der Station A1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)



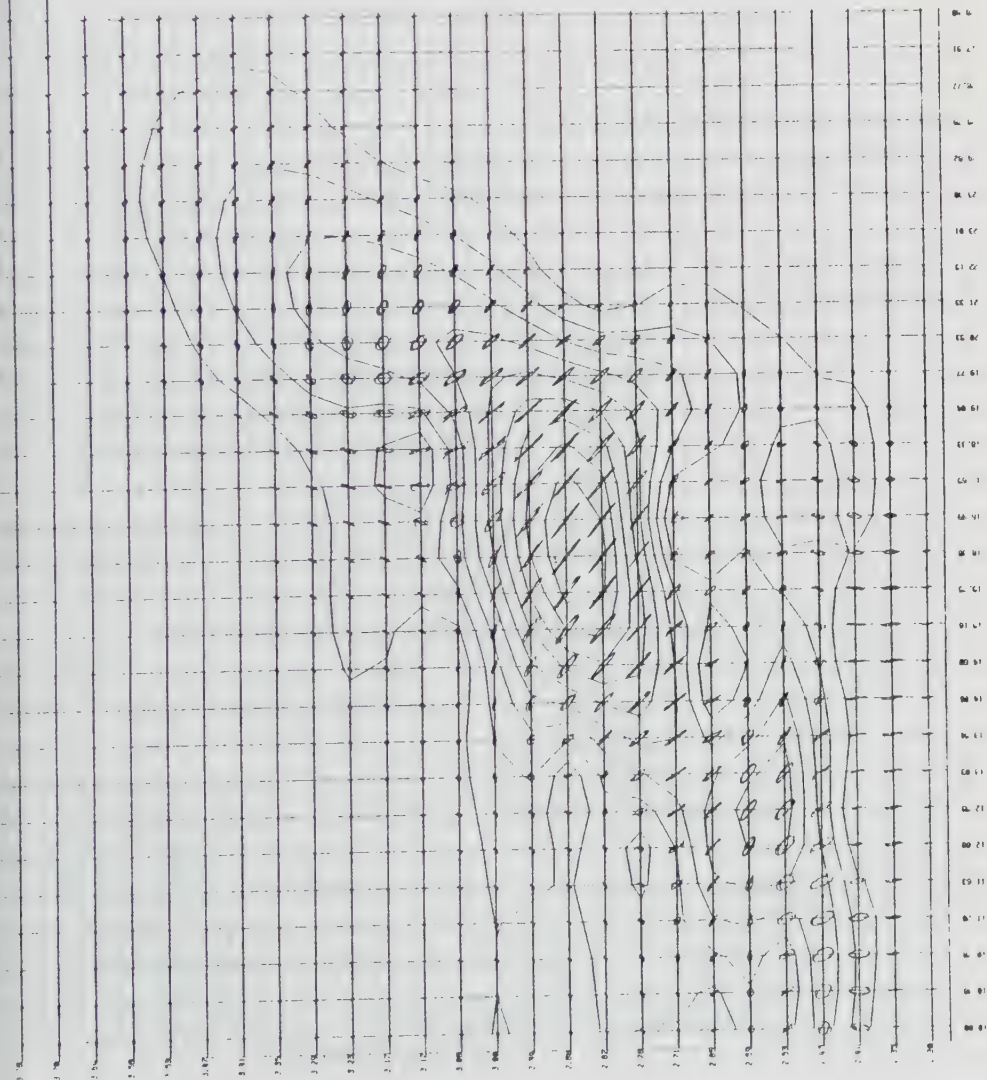
Polarisations-Dispersions-Matrix der Horizontal-Komponenten
der Station C1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)



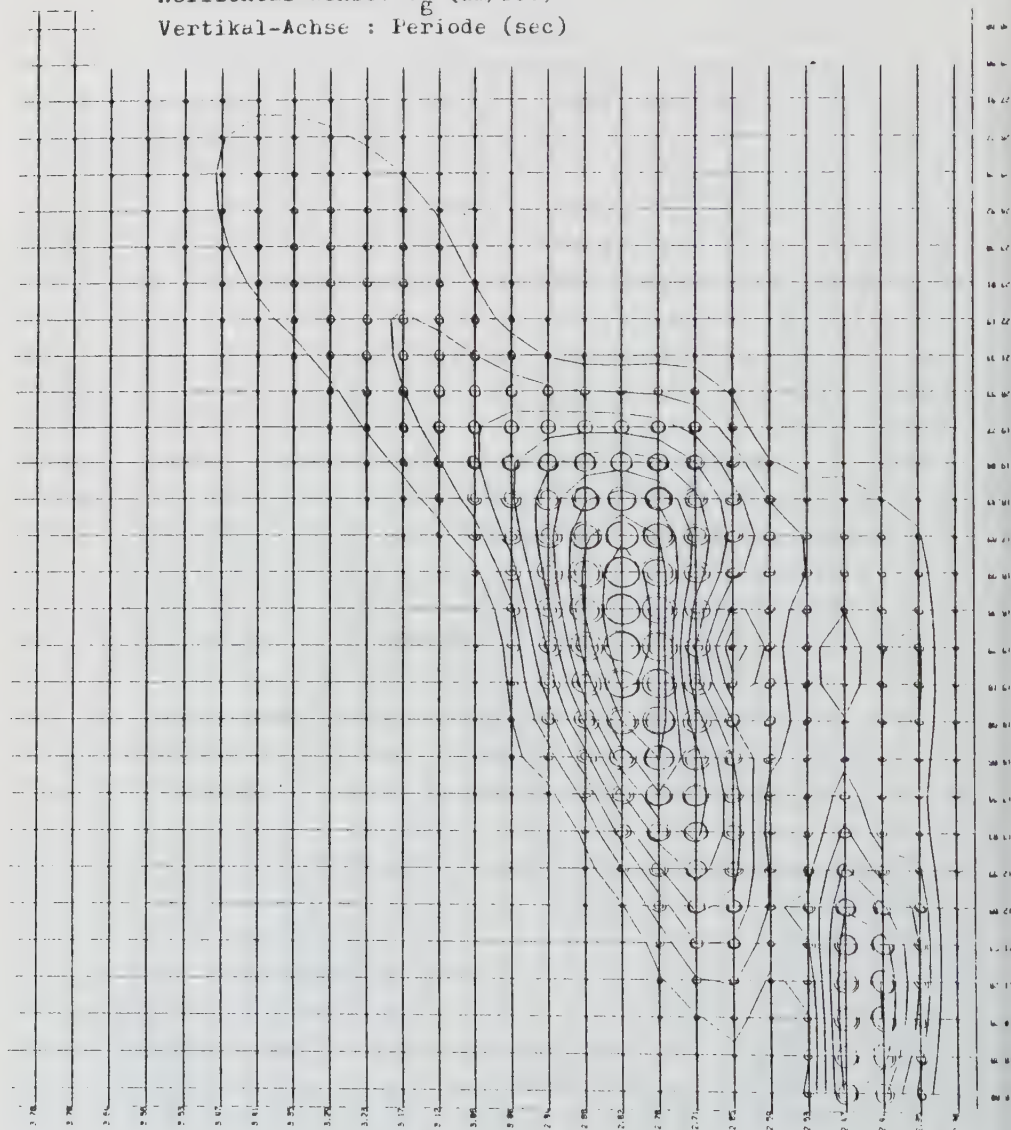
Polarisations-Dispersions-Matrix der Z- und R-Komponente
der Station A1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)



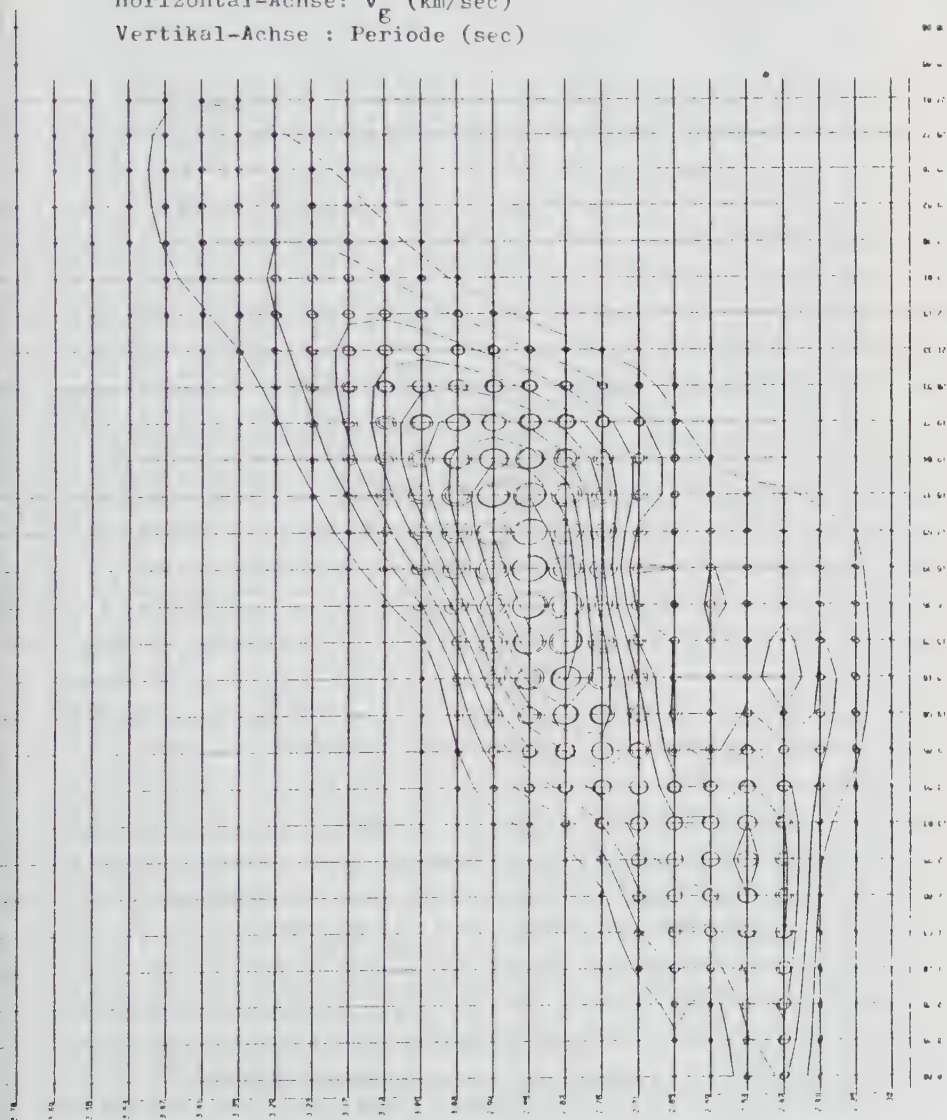
Polarisations-Dispersions-Matrix der Z- und R-Komponente
der Station C1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

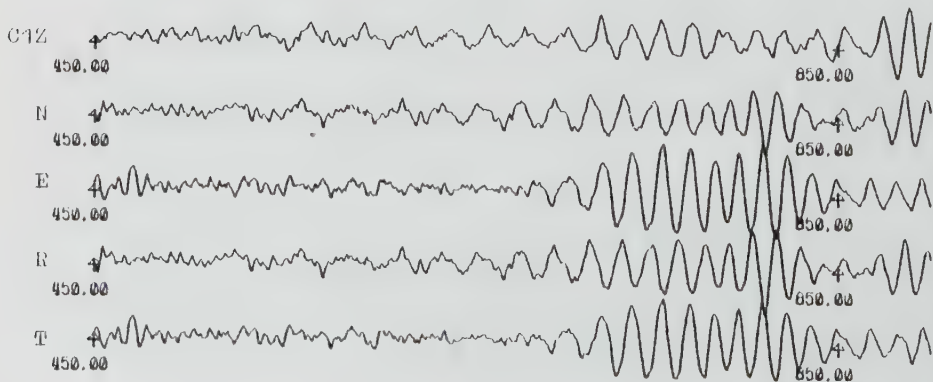
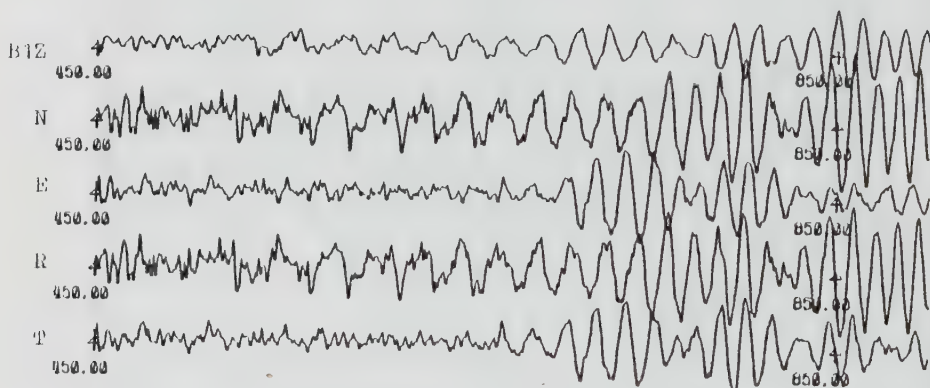
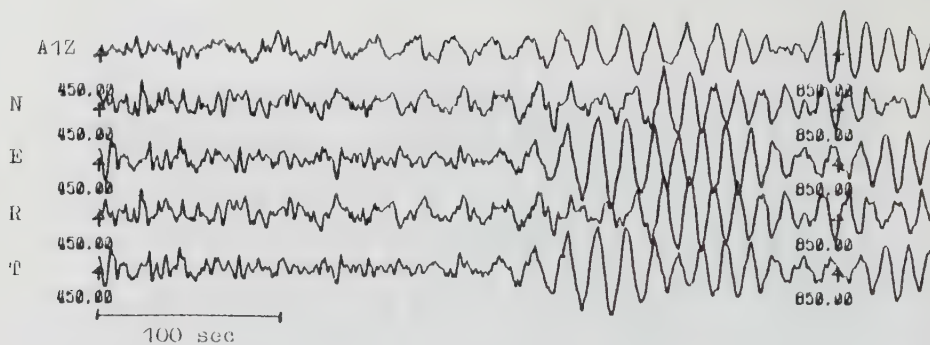
Vertikal-Achse : Periode (sec)



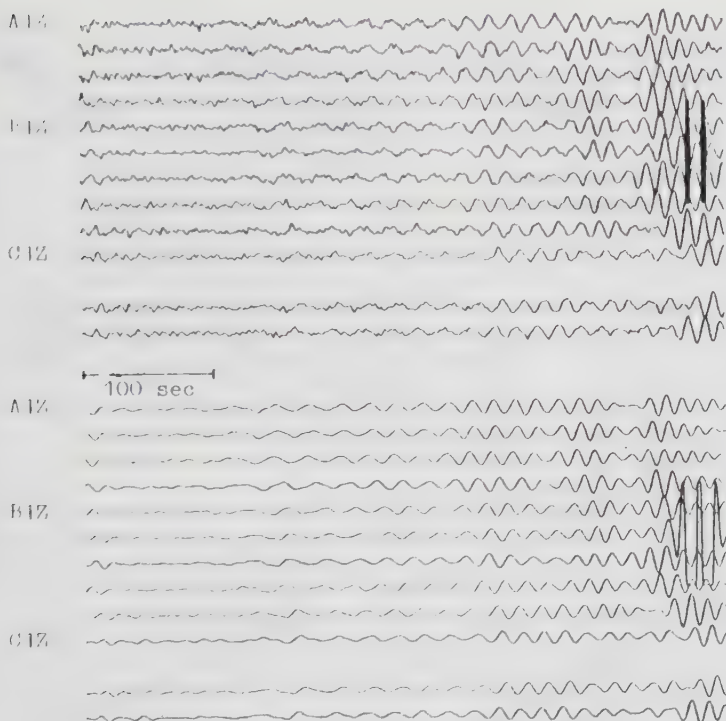
Jan Mayen

Bei allen drei 3K-Stationen ist im gesamten gezeichneten Ausschnitt ein deutlich dispergierter Wellenzug zu erkennen, bei dem die längeren Perioden mit geringen Amplituden von kurzperiodischem Noise überlagert sind. Die vermeintliche Airyphase mit großen Amplituden ist über einen relativ großen Zeitraum verschmiert. Auffallend sind die großen Amplituden der BI-N-Komponente. In den PDNS der II-Komponenten ist die Polarisationsrichtung ab Perioden > 20 sec relativ konstant, bei den einzelnen Stationen jedoch unterschiedlich: bei A1 ca. 15° grd W, bei B1 ca. 9° grd W und bei C1 wenige Grad in östliche Richtung. Bei Perioden < 20 sec ist die Polarisationsrichtung zwischen den Stationen völlig unterschiedlich. Zunächst wurde als erklärende Hypothese angenommen, daß der Effekt durch Interferenz der R0- und L0-Mode bewirkt wird, wobei beide Wellen etwa die gleiche Gruppengeschwindigkeit, jedoch leicht unterschiedliche Phasengeschwindigkeit und damit unterschiedliche Wellenlänge aufweisen, sodaß sich die Phasendifferenz zwischen den Wellen ortsabhängig ändert. Für die Abschätzung der Größenordnung der Phasenverschiebung wurde die Gruppengeschwindigkeits-Dispersion der R0-Mode invertiert und zu dem erhaltenen Modell die Wellenlängen der R0- und L0-Mode für entsprechende Perioden berechnet. Setzt man für die Amplituden der Wellen einen Verlauf $\sim \cos(\omega t - x/l_{RL} + \varphi_0)$ an, so ergibt sich für die räumliche Phasendifferenz $\Delta\varphi = (1/l_R - 1/l_L) \cdot \Delta x$, wobei die Dispersion der Wellen für hinreichend kleine Δx ($< \text{eine Wellenlänge}$) vernachlässigt wird. Im vorliegenden Fall betragen die Wellenlängen bei einer Periode von 15 sec $l_R = 52.6$ km und $l_L = 55.3$ km, woraus eine Phasendifferenz in 50 km Entfernung $< 3^\circ$ resultiert. Mit dieser Hypothese kann weder die unterschiedliche Öffnung der Schwingungsellipsen noch ihre unterschiedliche Richtung erklärt werden, was auch durch ein Simulations-Experiment mit theoretischen Seismogrammen an einem ähnlichen Modell bestätigt wird. Ein anderer Erklärungsversuch unterstellt eine heterogene Struktur innerhalb der GKF-Arrays, wobei es schwer fällt, einem bislang mit anderen geophysikalischen Untersuchungsmethoden noch nicht georteten Störkörper in Anbetracht der im Verhältnis zu den Wellenlängen geringen Ausdehnung des GKF-Arrays, einen dermaßen starken Einfluß auf die Wellen zuzuschreiben. Andererseits sei hier auf die verblüffenden Unterschiede im Aussehen von Raumwellen von Beben aus dem ägäischen Raum hingewiesen, wie sie von Rademacher et al. ('83) beschrieben, jedoch nicht zweifelsfrei erklärt werden. Obgleich in der Montage aller GKF-Registrierungen keine deutlichen Schwebungsminima zu erkennen sind, muß als dritter Erklärungsversuch angenommen werden, daß es in dem Periodenbereich < 20 sec zu einer Interferenz von sich über mehrfache Wege ausbreitende R0-Wellen kommt. In der Tat löst die wKA bei Perioden < 15 sec wenigstens zwei verschiedene Wellengruppen auf, wobei eine ein Azimut von ca. 63° grd W, die andere eines von 9° grd E aufweist, beide deutlich abweichend vom geographischen

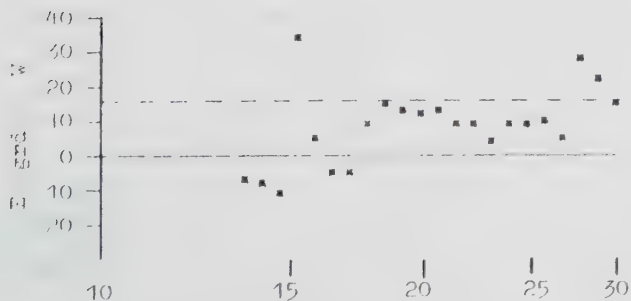
Azimet von 15 grd W. Im Periodenbereich > 15 sec werden die beiden Wellenzüge als solche nicht bzw. nicht deutlich getrennt analysiert, jedoch fällt die relativ große Streuung der Azimute auch bei langen Perioden auf. Insgesamt scheint die Welle etwas weiter aus Norden einzufallen, als geographisch berechnet. Wie zu erwarten, bewirkt eine Drehung der H-Komponenten um 15 grd in die R- und T-Komponenten nur wenig Änderung im Aussehen der Zeitreihen. Wie auch bei den H-Komponenten zeigt die PDA der R- und Z-Komponenten bis ca. 20 sec ein durchweg uneinheitliches Verhalten. Bei der Station B1 ist, wie bereits im Zeitbereich aufgefallen, die R-Komponente im gesamten Periodenbereich größer als die Z-Komponente, so daß die Ellipsen durchweg "liegen". Die Meßprotokolle ergaben keinen Hinweis auf eine Fehleinstellung; die Registrierung wurde wegen ihrer Einzigartigkeit jedoch nicht weiter ausgewertet. Die Halbachsen der Schwingungsellipsen schließen bei der A1 und C1 Station fast durchweg relativ große Winkel zur Vertikalen ein. Schließt man Elliptizitätswerte für Perioden 20 sec aus, so ist die Ähnlichkeit zwischen dem Verlauf der Elliptizitätskurven der A1 und C1 Station bemerkenswert gut mit den theoretischen überein. Auch die Anpassung der Gruppengeschwindigkeits-Dispersion durch Modellrechnung ist recht gut. Dabei bleibt die Energie der E-W-Komponenten unerklärt, da die Modellrechnung für Love-Wellen in diesem Periodenbereich eine höhere Gruppengeschwindigkeit ergibt.



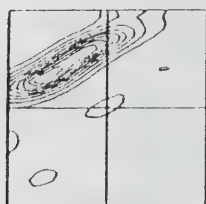
Vertikal-, NS-, EW-, Radial- und Transversal-Komponente
der Station A1, B1, C1



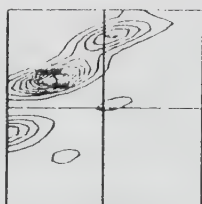
Vertikal-Komponenten der Stationen A1-C4 ,
10sec-TP-gefiltert (unten)



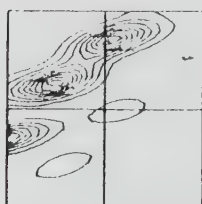
Ankunftsrichtung der RO-Mode in
Abhängigkeit von der Periode
gemäß der ω -k-Analyse



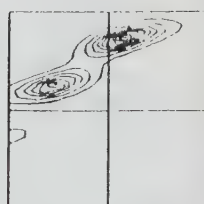
12.5



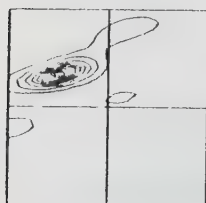
13.



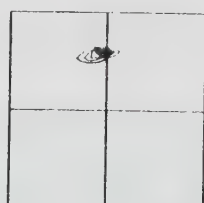
13.5



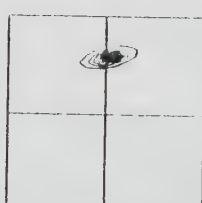
14.1



14.6



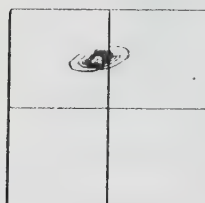
15.2



15.8



16.4



17.



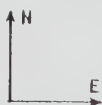
17.7



18.5



19.



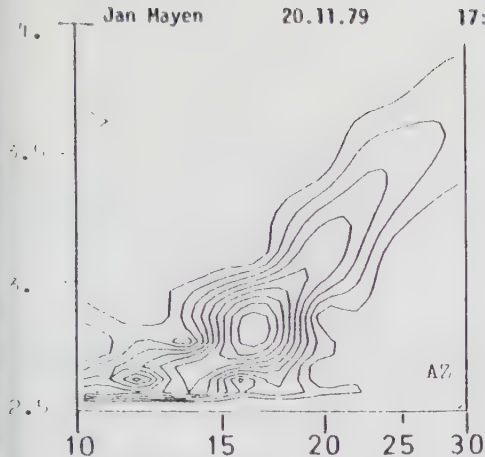
ω_k -Analyse der RO-Mode ; die Zahlen geben die Periode in sec an

Jan Mayen

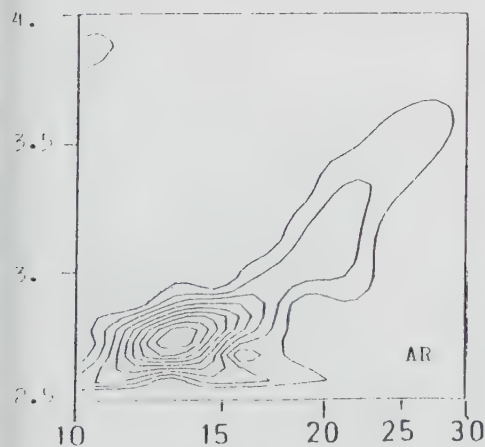
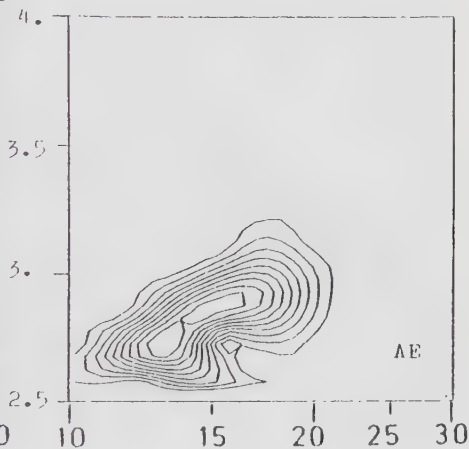
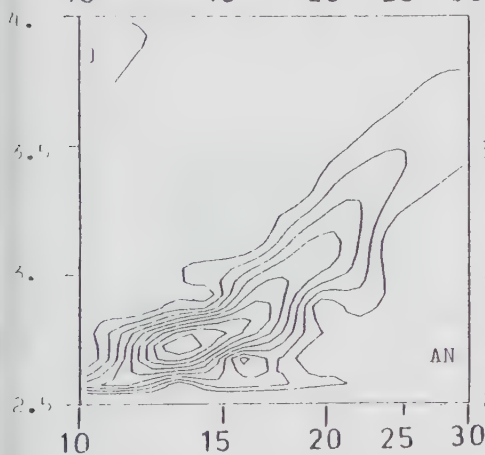
20.11.79

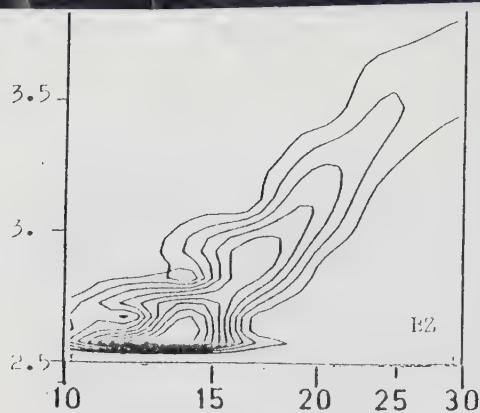
17:36:01.5

71.13 N 8.16 W

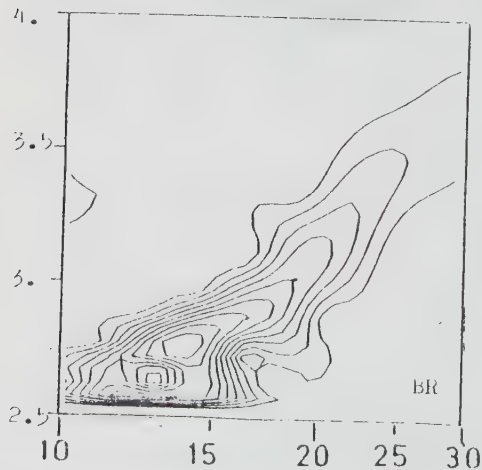
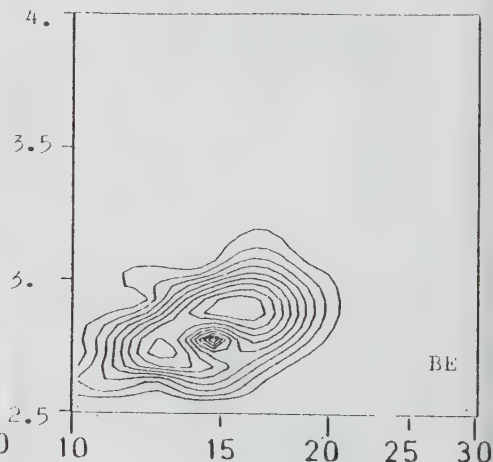
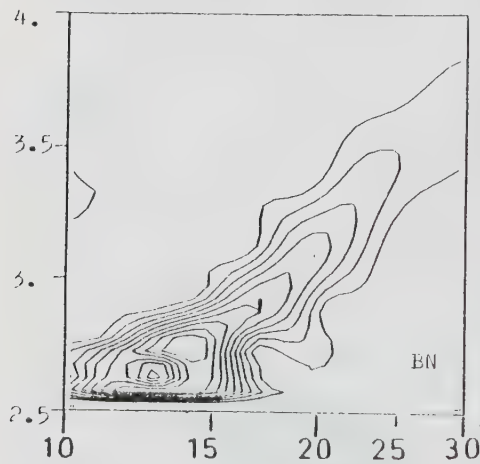


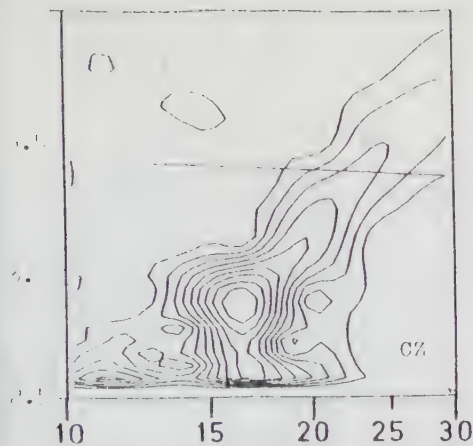
Gabor - Matritzen
 der Station A1
 horizontal : Periode (sec)
 vertikal : Gruppengesch. ,
 (km/sec)



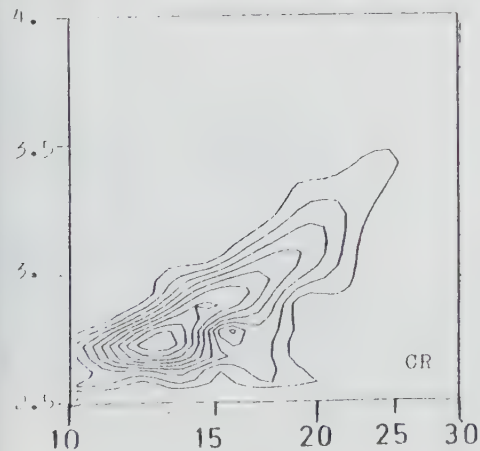
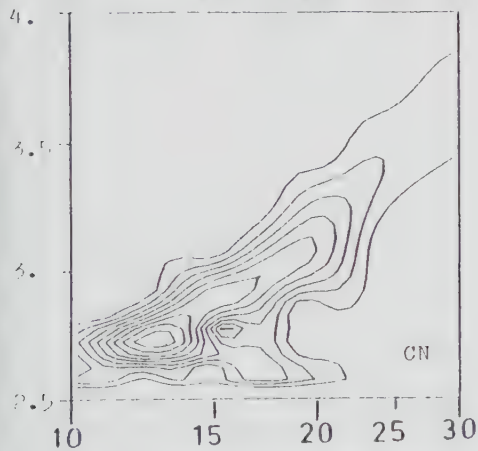


Gabor - Matrizen
 der Station B1
 horizontal : Periode (sec)
 vertikal : Gruppengesch.
 (km/sec)





Gabor -Matritzen
 der Station C1
 horizontal : Periode (sec)
 vertikal :Gruppengesch.
 (km/sec)



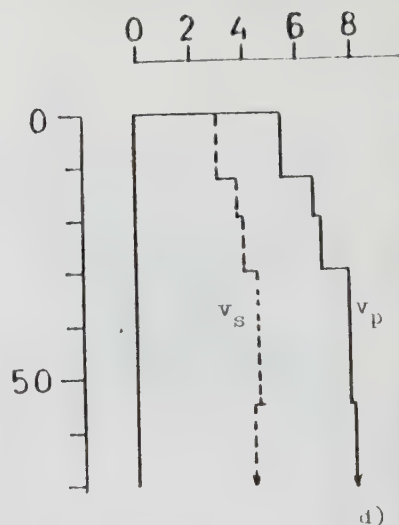
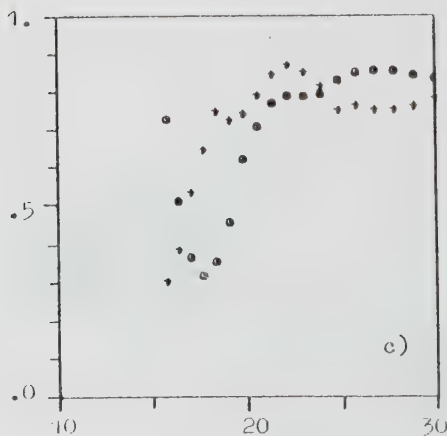
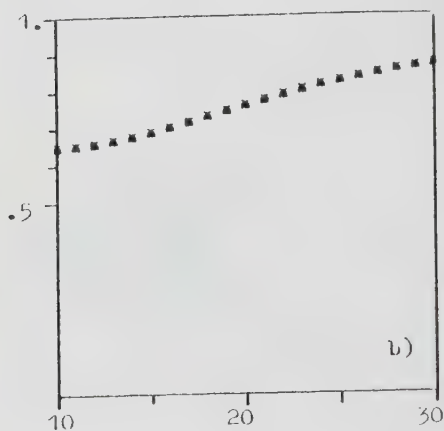
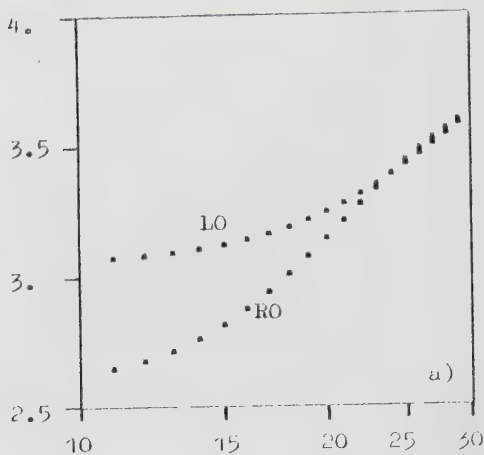
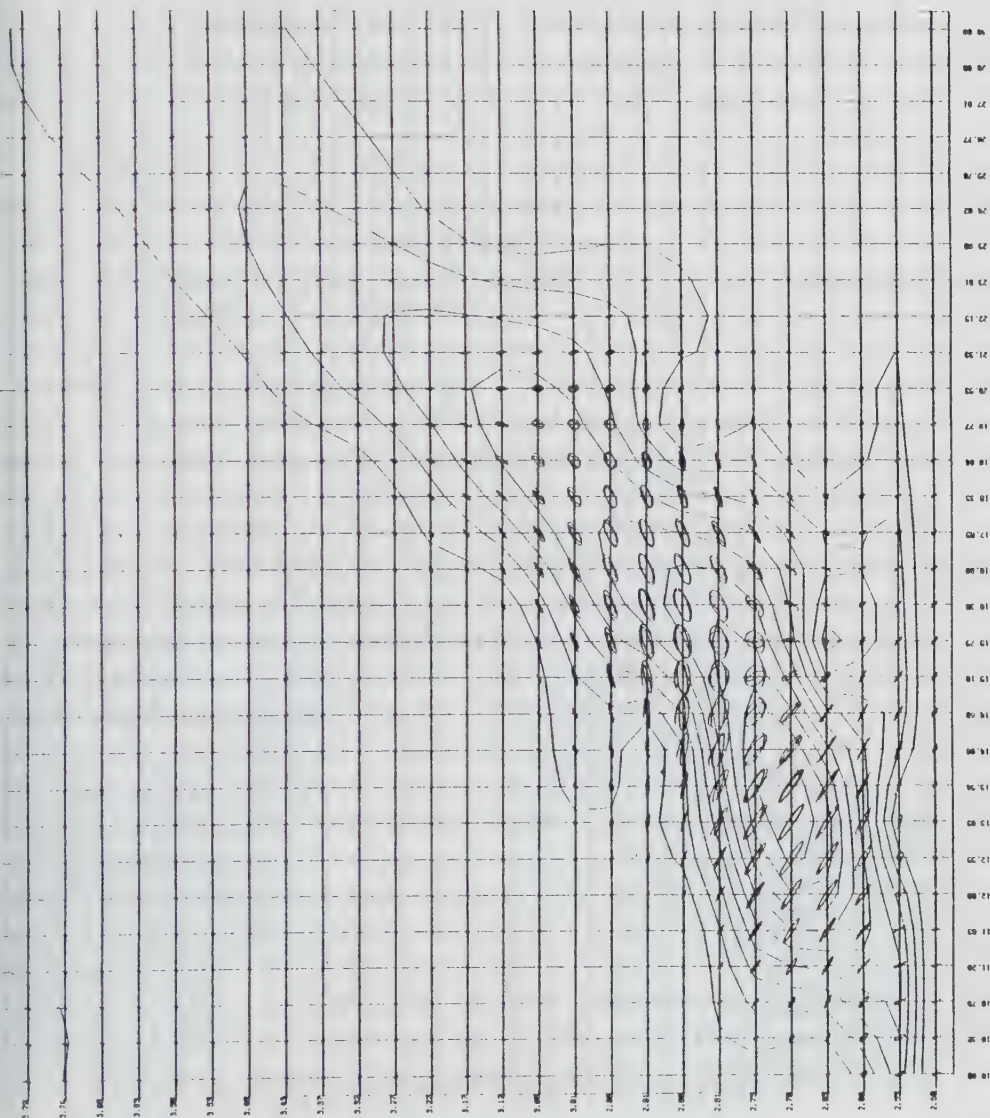


Abb. a) Theoretische Gruppengeschwindigkeit
Dispersion
horizontal : Periode (sec)
vertikal : v_g (km/sec)

Abb. b) und c) Theoretische und gemessene
Elliptizitäten in Abhängigkeit
von der Periode
 $\odot \hat{=} A1$, $+$ $\hat{=} C1$

Abb. d) den theoretischen Kurven
zugrundeliegendes Geschwindigkeits-Tiefen-Modell.



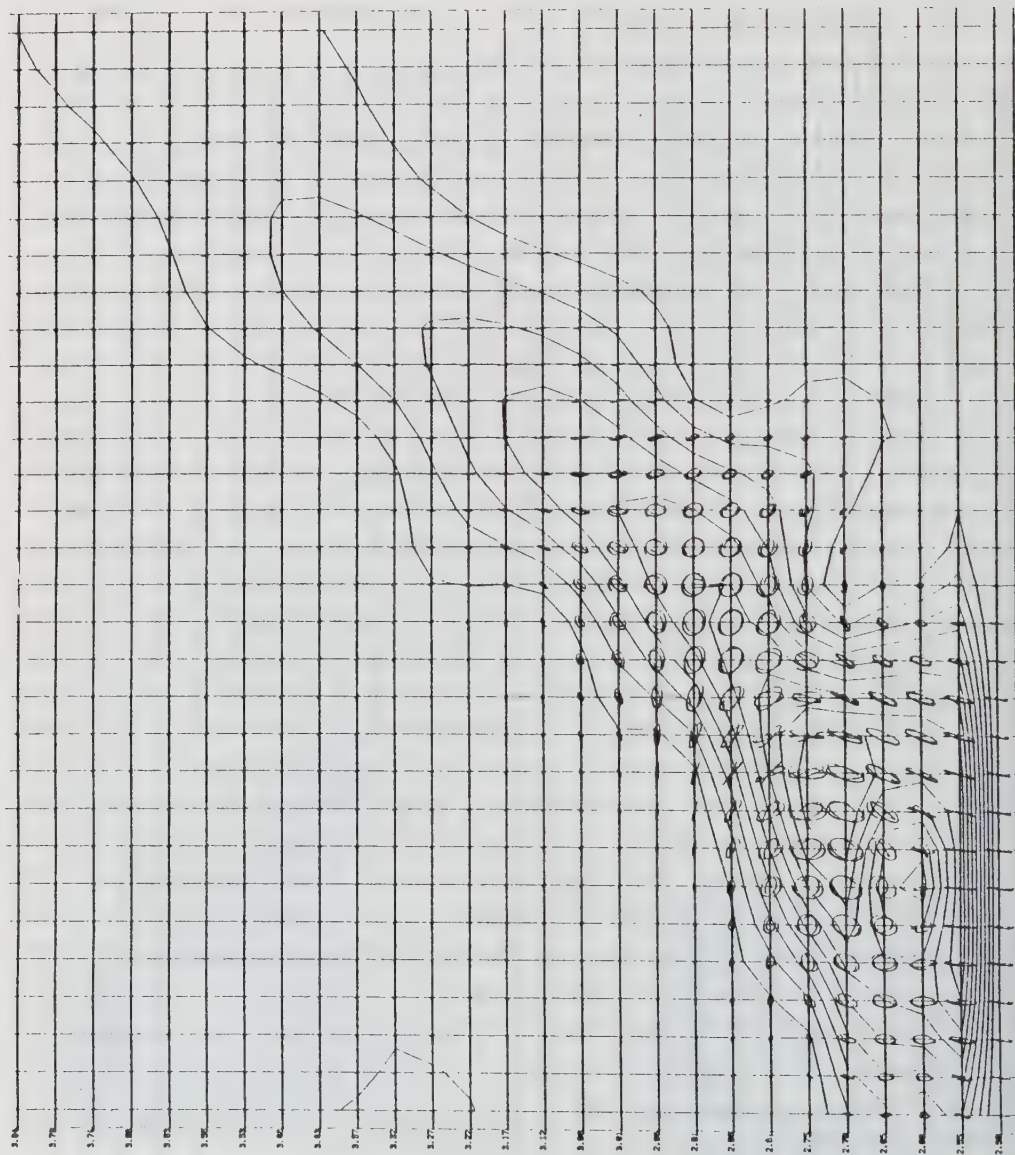
Polarisations-Dispersions-Matrix der Horizontal-Komponenten
der Station A1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)



Polarisations-Dispersions-Matrix der Horizontal-Komponenten
der Station B1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

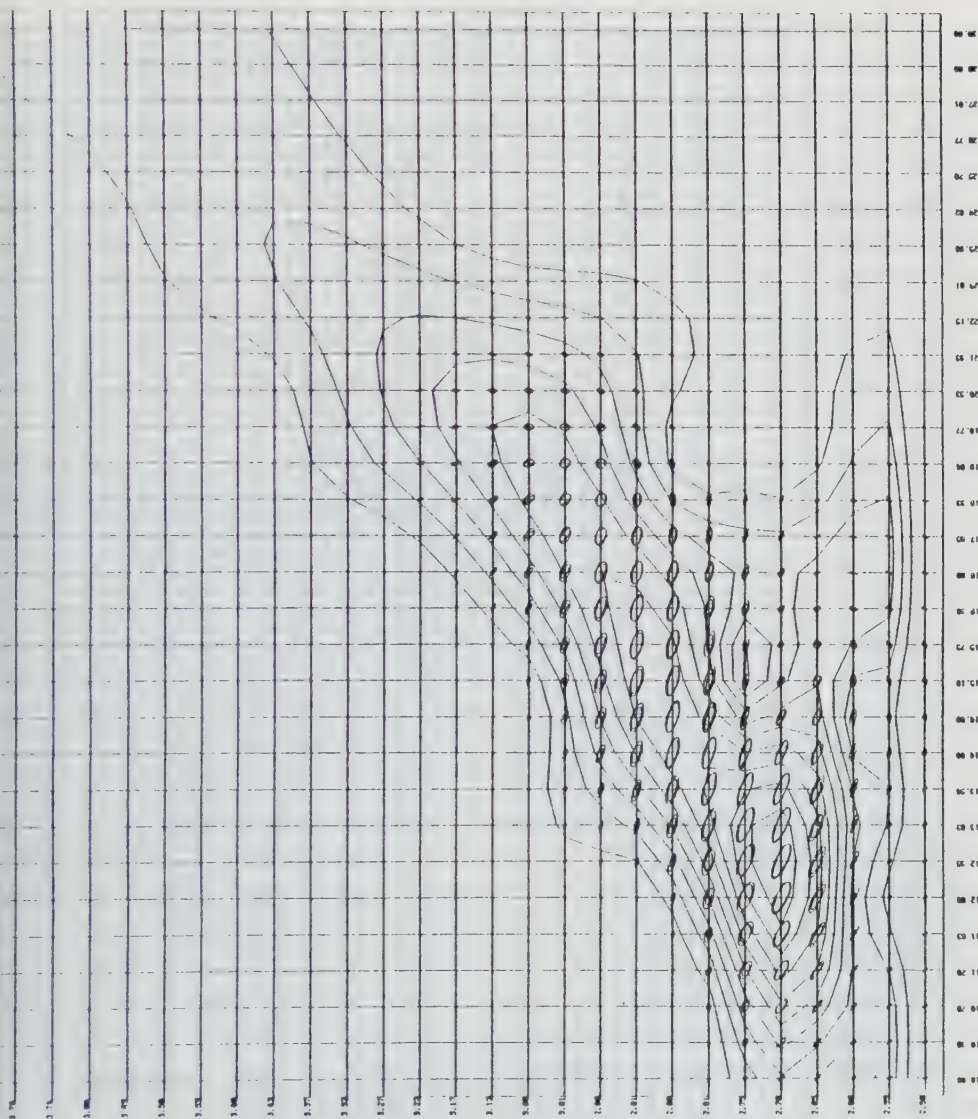
Vertikal-Achse : Periode (sec)

Jan Mayen

20.11.79

17:36:01.5

71.13 N 8.16 W



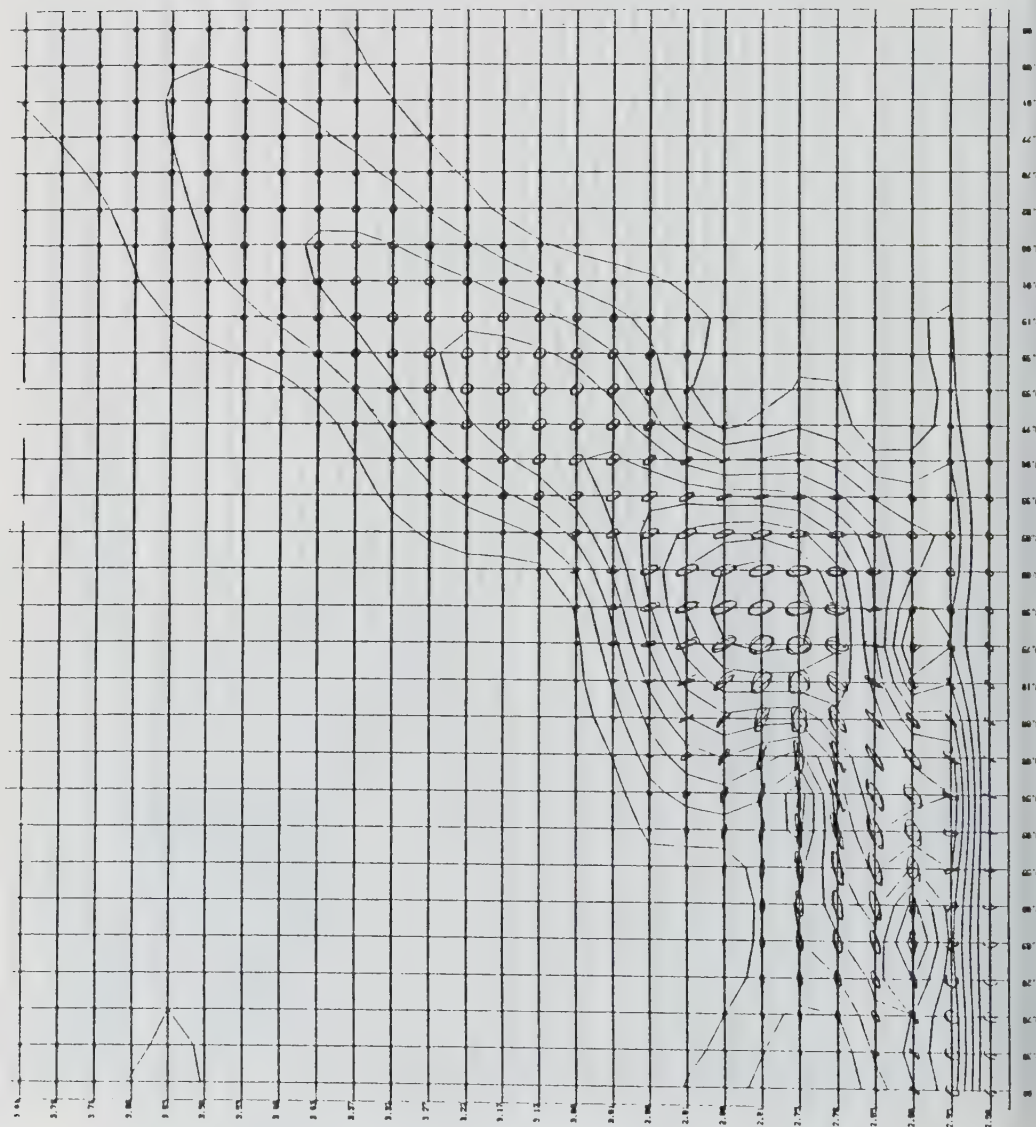
Polarisations-Dispersions-Matrix der Horizontal-Komponenten
der Station C1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_E (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)



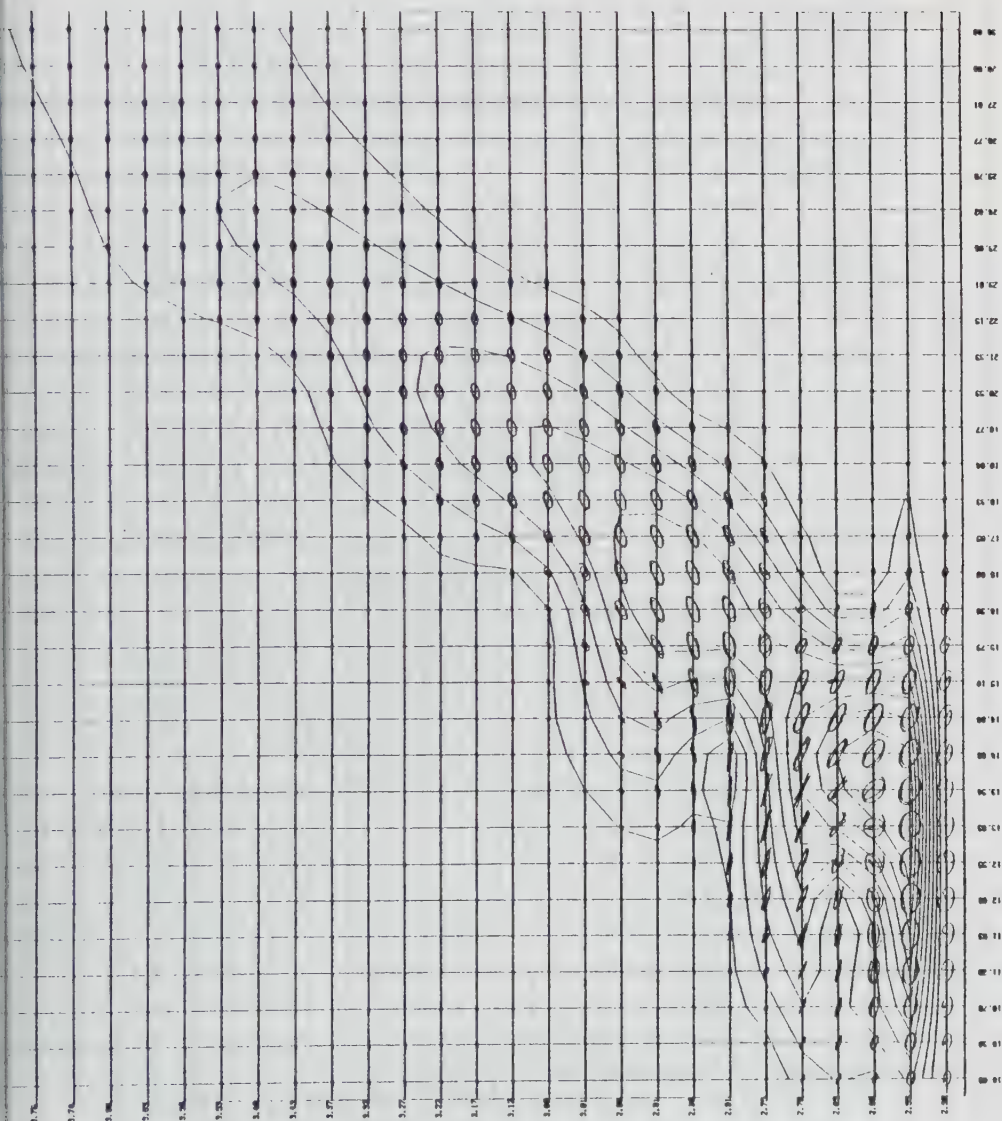
Polarisations-Dispersions-Matrix der Z- und R-Komponente
der Station A1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)



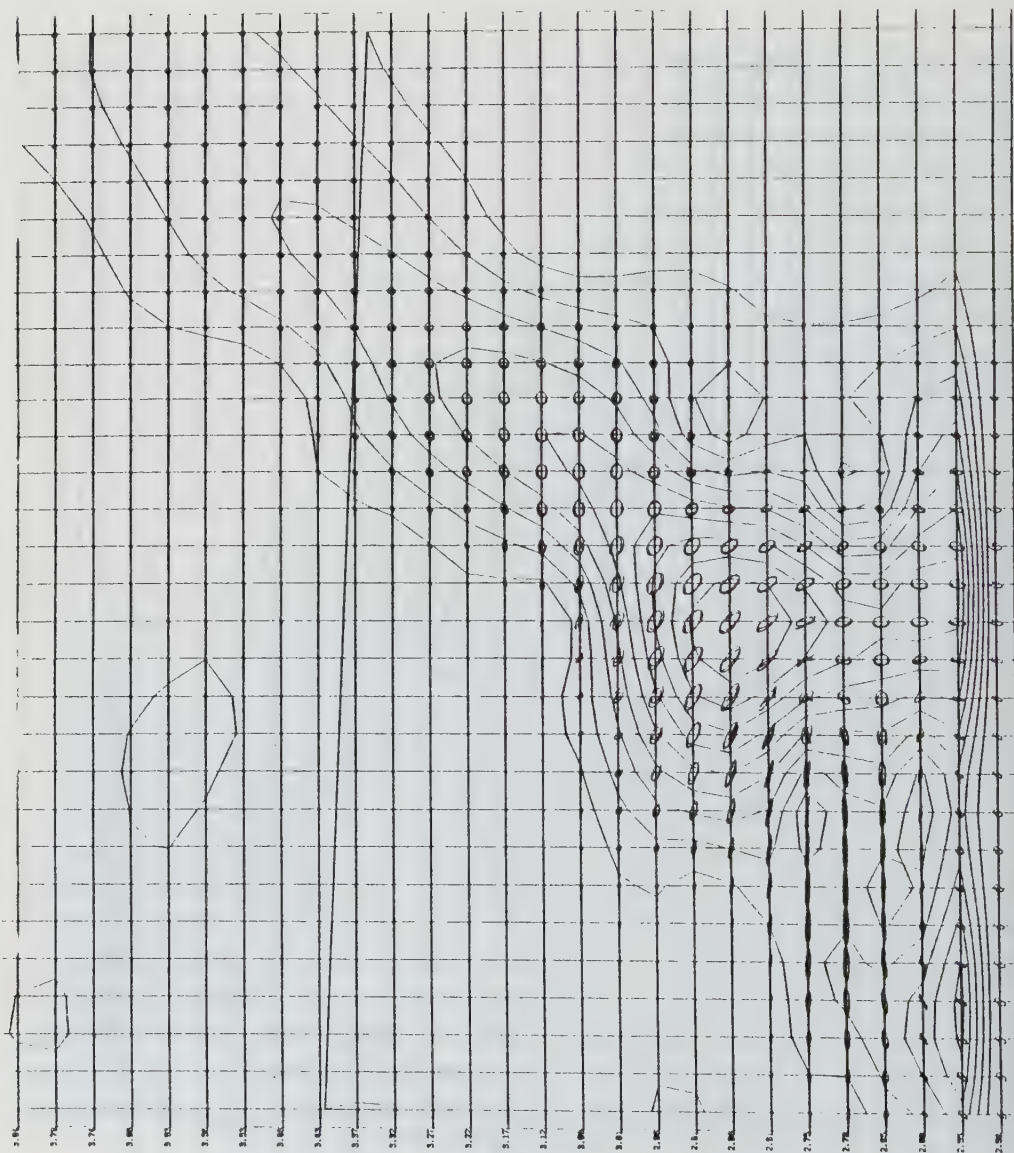
Polarisations-Dispersions-Matrix der Z- und R-Komponente
der Station B1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)



Polarisations-Dispersions-Matrix der Z- und R-Komponente
der Station C1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: v_g (km/sec)

Vertikal-Achse : Periode (sec)

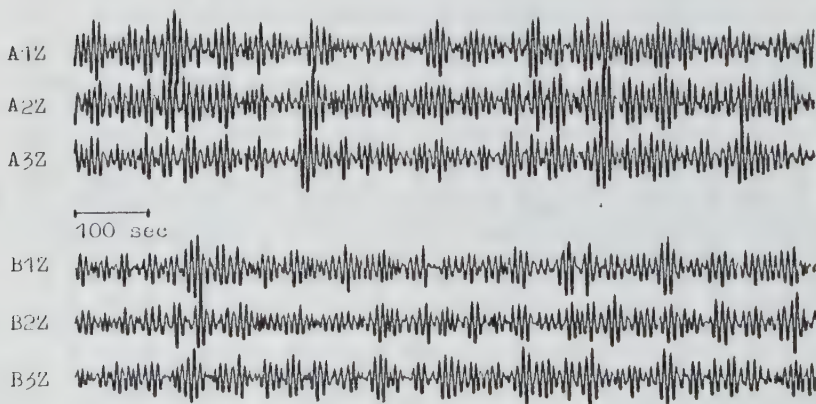
Mikro-Seismik

Außer Oberflächenwellen von Erdbeben wurde auch ein Beispiel von Mikroseismik analysiert, um Aussagen über die Konstanz der Polarisation des Wellenfeldes machen zu können, das häufig als aus Rayleigh-Wellen aufgebaut angesehen wird. In den 3K-Registrierungen ist genauso wie in der Montage der Z-Komponenten ein unregelmäßiges An- und Abschwellen von Schwingungen einer mittleren Periode von ca. 7-8 sec zu beobachten.

Eine vom voreingenommenen Beobachter festgestellte Korrelation von Wellenpaketen zwischen Z- und N-Komponenten dürfte statistisch wohl eher an der Signifikanzgrenze liegen. In der Montage der Z-Komponenten lassen sich Wellengruppen z.T. über die Subarraygrenzen hinaus verfolgen, praktisch jedoch nie über das gesamte Array. Bei der PDA ist der Geschwindigkeitsmaßstab in Ermangelung einer festlegbaren Herzeit beliebig, der analysierte Ausschnitt stimmt mit den ersten 512 sec der abgebildeten 3K-Registrierung überein. Die Hauptenergie beschränkt sich auf Perioden von ca. 6-10 sec. Die Polarisation der H-Komponenten ändert sich zeitlich und mit der Periode recht rasch, wobei im Mittel lineare Polarisation mit größeren Amplituden kleinere Winkel zur N-S Richtung einschließt, als mit der E-W Richtung. Bei kleineren Amplituden im Periodenbereich < 6 sec gilt auch diese schwache Aussage nicht mehr. Die wKA zeigt in fast allen 200-sec-Ausschnitten bei Perioden von 10 und 8 sec mehrere Maxima, deren energiereichstes häufig nur wenige Grad vom Azimut 0 grad entfernt liegt. Die Vermutung, daß die Mikroseismik durch schweren Seegang auf angrenzenden Meeren angeregt wird, wird dadurch bestätigt. Durchweg verworrener sind die Verhältnisse bei der wKA bei 6 sec Periode, wo stets viele Maxima ohne deutliche Vorzugsrichtung nachgewiesen sind, was auch dem Ergebnis der PA entspricht. Wie zu erwarten, ergibt sich in den PDMs der Z- und N-Komponenten eine rasch sich verändernde Polarisation, die auch zwischen den Stationen keine Ähnlichkeit aufweist.



Vertikal- und Horizontalkomponenten der Stationen A1, B1



Vertikal-Komponenten der Stationen A1-C4

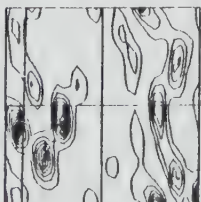
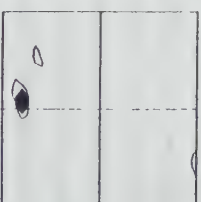
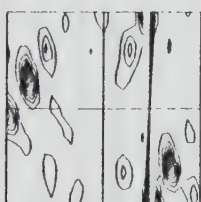
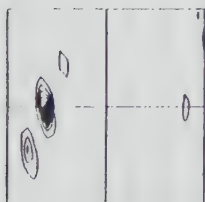
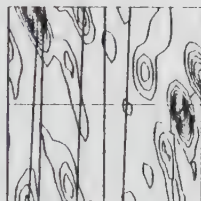
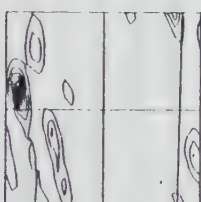
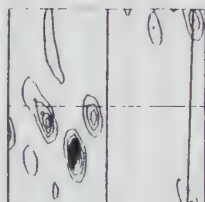
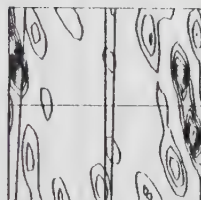
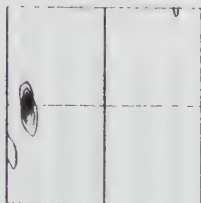
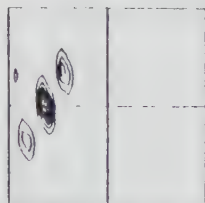




10 sec

8 sec

6 sec



ω_k -Analyse in fortlaufenden 200-sec-Intervallen bei den
Perioden 10,8 und 6 sec

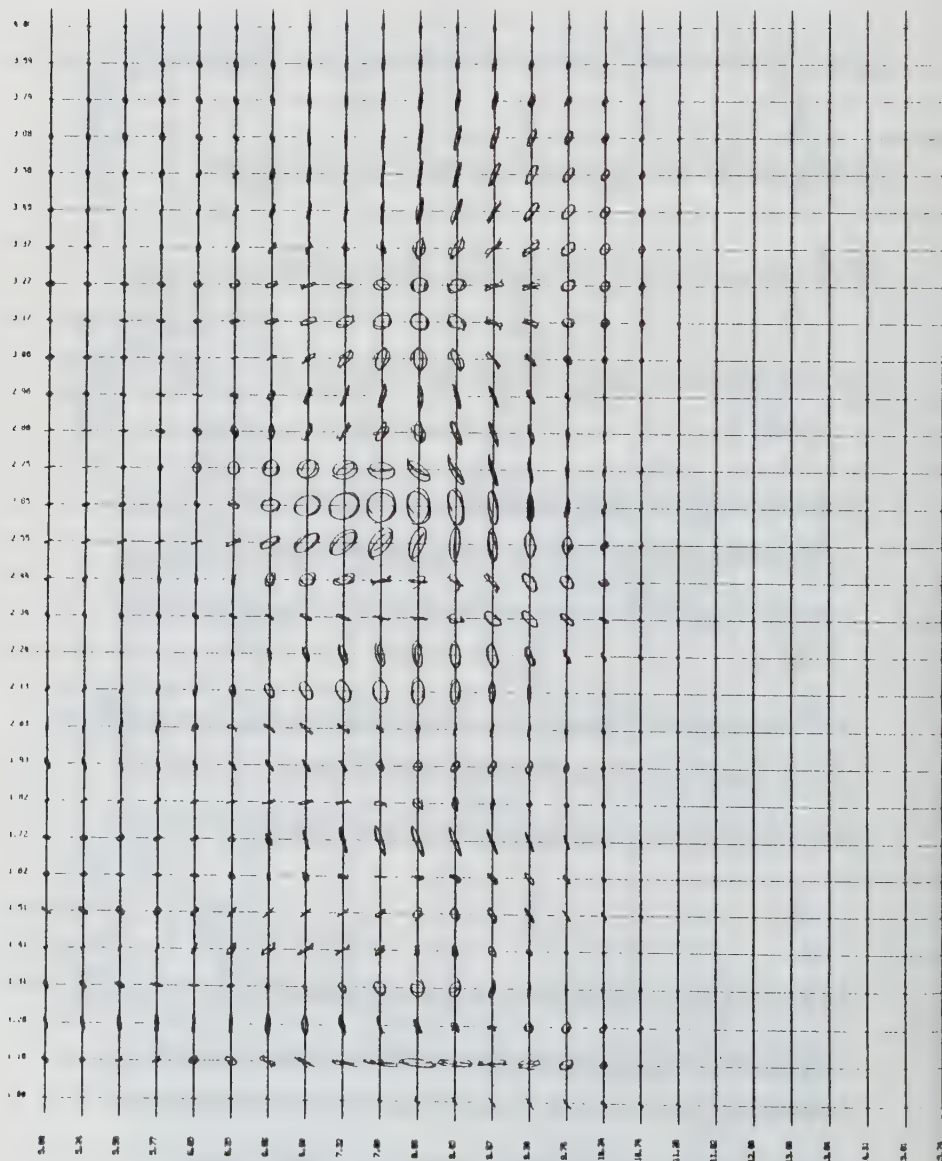
Polarisations-Dispersions-Matrix der Horizontal-Komponenten
der Station A1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: Periode (sec)

Vertikal-Achse : v_g (km/sec)



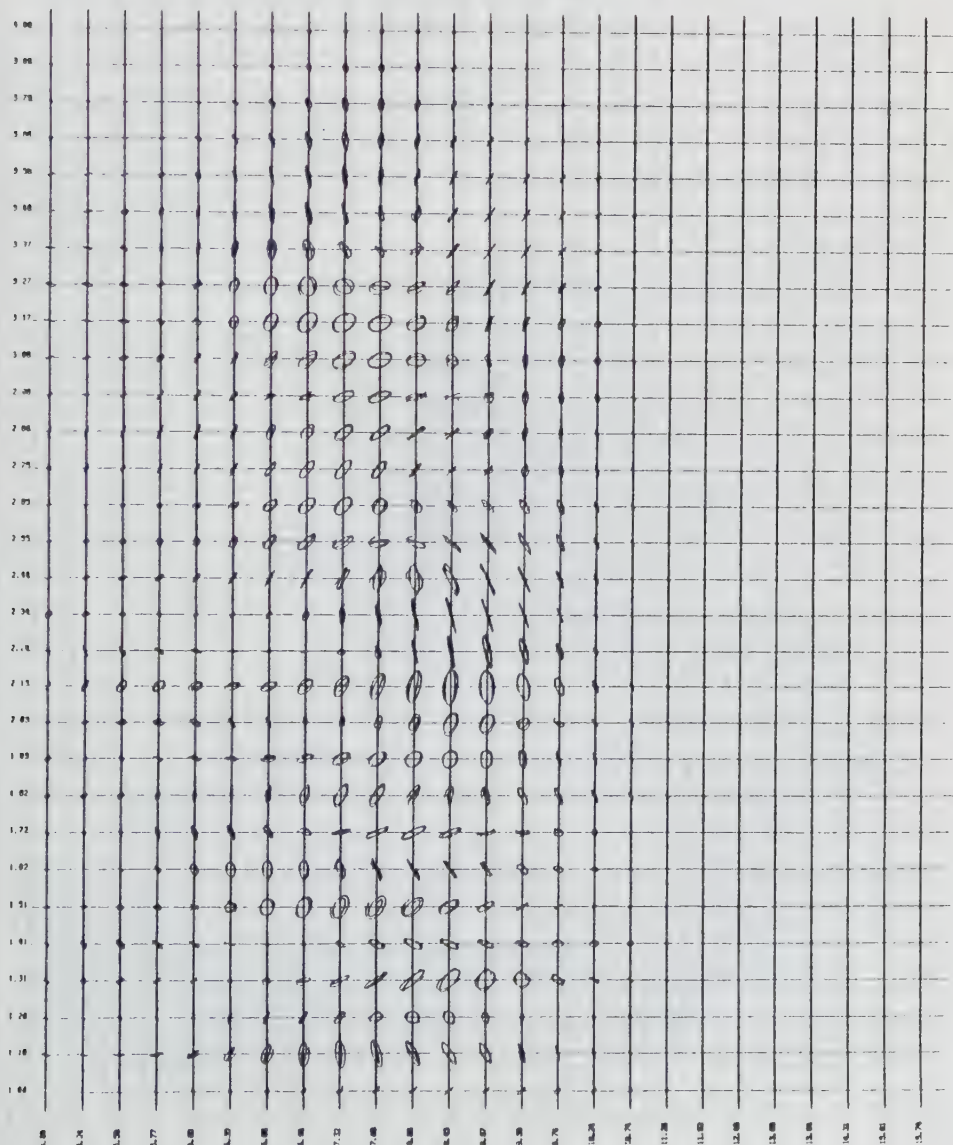
Polarisations-Dispersions-Matrix der Horizontal-Komponenten
der Station B1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: Periode (sec)

Vertikal-Achse: v_g (km/sec)



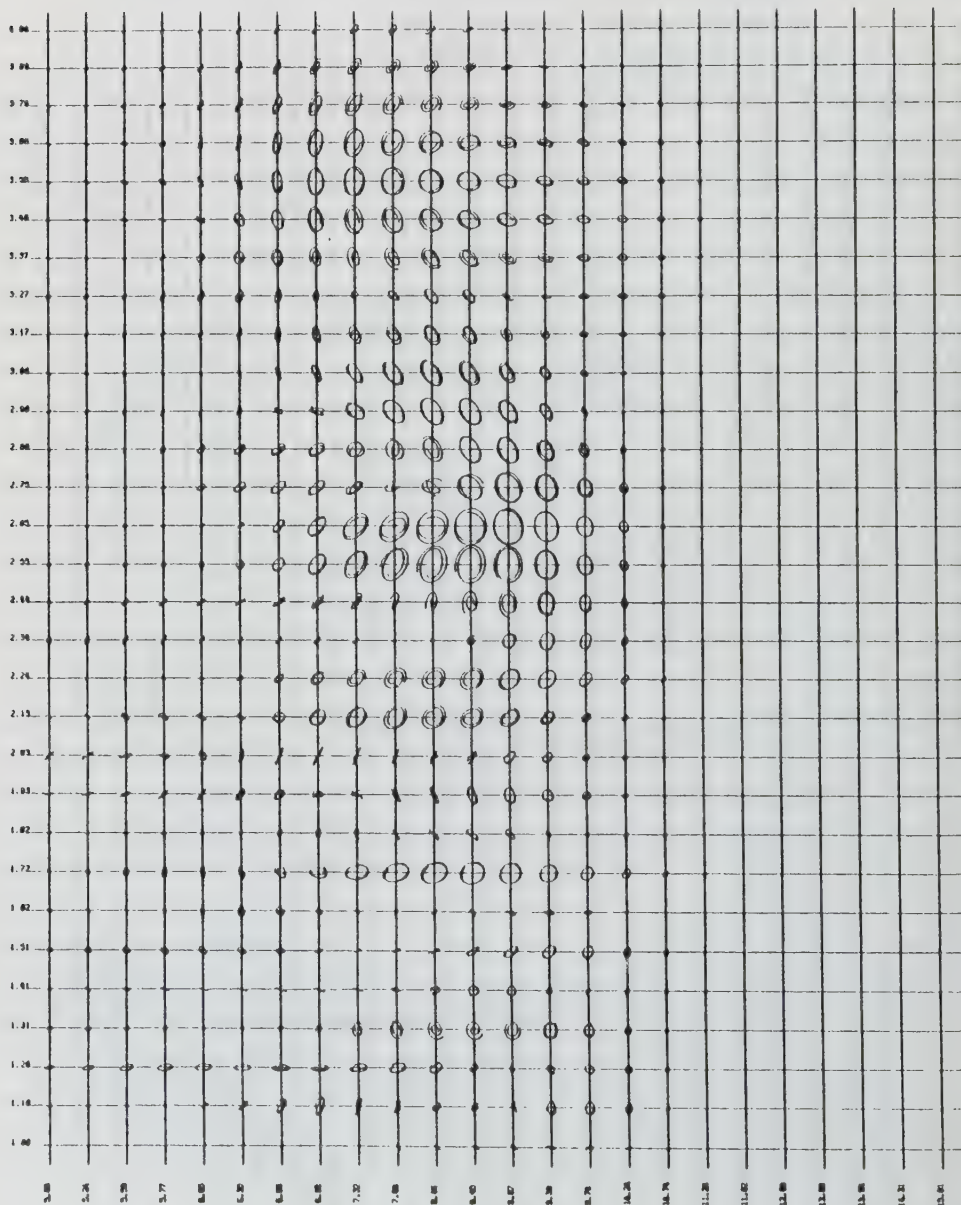
Polarisations-Dispersions-Matrix der Z- und N-Komponente
der Station A1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: Periode (sec)

Vertikal-Achse : v_g (km/sec)



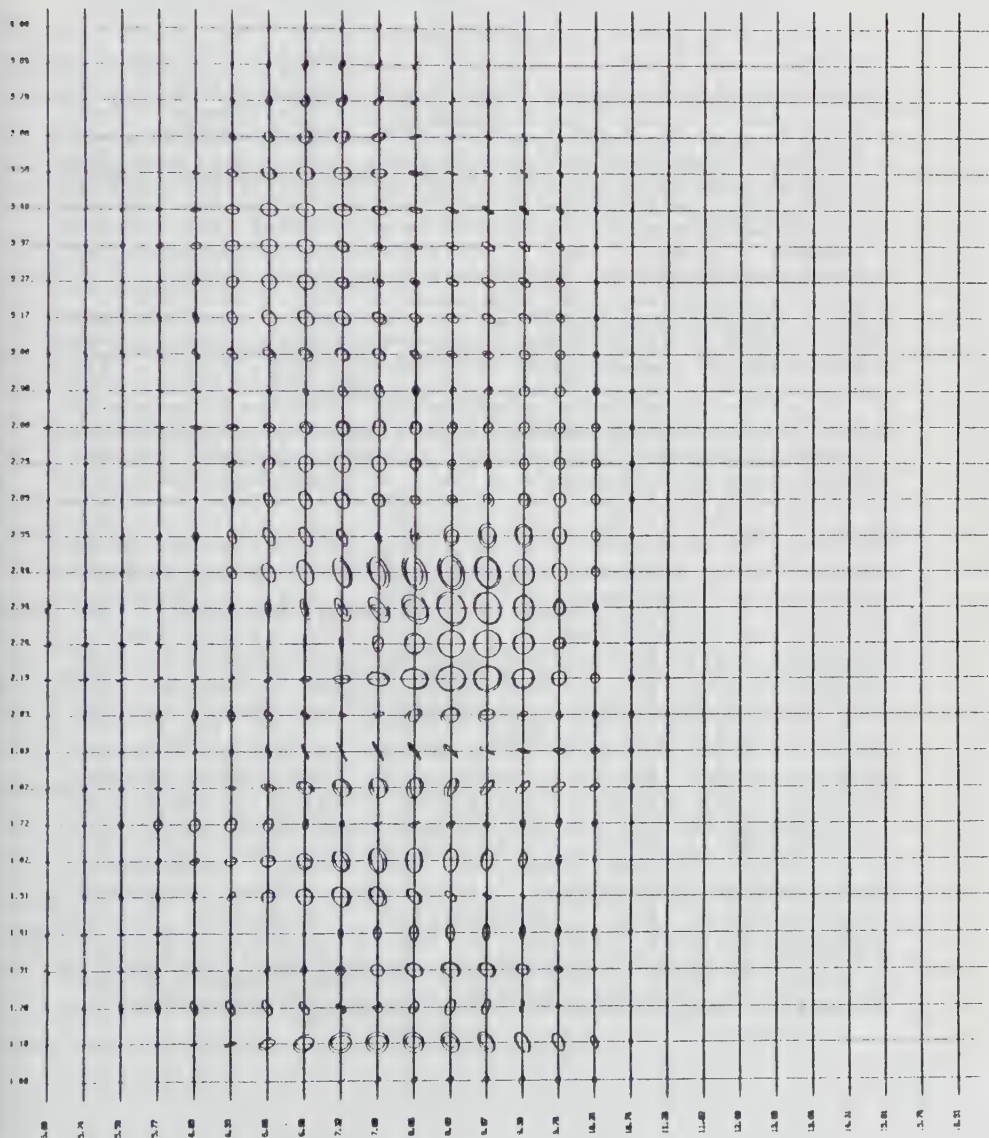
Polarisations-Dispersions-Matrix der Z- und N-Komponente
der Station B1

Orientierung der Hodographen :



Horizontal-Achse: Periode (sec)

Vertikal-Achse : v_g (km/sec)



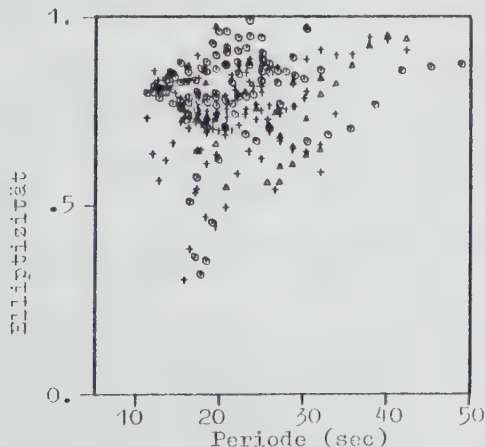
KAPITEL 5

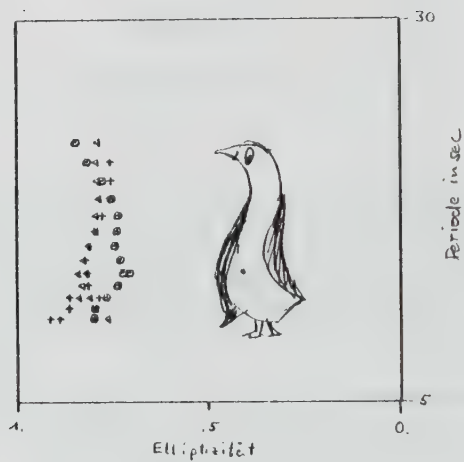
Zusammenfassung

Entgegen den , in der Theorie der Wellenausbreitung in eben geschichteten Medien begründeten, Erwartungen, zeigt das Polarisationsverhalten von Oberflächenwellen am Gräfenberg-Array eine zu große Streuung, um es zur Grundlage von Modellrechnungen zu machen. Als ein wesentlicher Faktor für die Streuung muß die Ausbreitung der Oberflächenwellen über mehrfache Wege , durch laterale Refraktion verursacht, angesehen werden. Die kombinierte Polarisations- und Dispersions-Analyse der Horizontal-Komponenten erweist sich als sehr sensitives Verfahren, um die Überlagerung mehrerer Wellen an einer Station zu erkennen . Azimutale Mißweisungen der Polarisation bei gleicher Quellregion werden durch die Algerien- und Island-Beben als reproduzierbare Beobachtungen bestätigt. Weniger klar sind die Verhältnisse bei den Beben aus N-E-Asien, bei denen z.T. auch Unterschiede zwischen den Beobachtungsstationen zu erkennen sind. Ähnliche Abweichungen wurden für die gleiche Quellregion durch Laufzeitdifferenzen von Raumwellen bei Subarray-Peilungen von S. Faber ('83) bereits nachgewiesen. Eine weitergehende Systematik in dem Polarisationsverhalten von Oberflächenwellen wurde nicht erkannt, was insofern erstaunt, als die Abstände der Dreikomponenten- Stationen nur ein bis zwei Wellenlängen betragen, sodaß insgesamt eine größere Ähnlichkeit der Polarisation zwischen den Stationen zu erwarten sein sollte. Wenngleich die Ausbreitung über mehrfache Wege einen Teil der Unterschiede erklären mag, muß doch bedacht werden, daß auch die Störung des Wellenfeldes durch Interferenz die Größenordnung von Wellenlängen hat. Man kann damit kaum umhin, (einen) streuende(n) Störkörper im Gebiet des Arrays zu postulieren, der die beobachteten Phasenfluktuationen erklärt. Die Frequenz- Wellenzahl- Analyse ist, wie durch ein Simulationsexperiment nachgewiesen wurde, in Anbetracht des Verhältnisses von Array-Apertur zu interessierenden Wellenlängen, nicht mehr in der Lage, hinreichend signifikante Ergebnisse zu liefern, um azimutale Abweichungen der Polarisation zwingend durch Anisotropieeffekte erklären zu müssen oder auch laterale Refraktionen an einem Störkörper in der Nähe des Arrays zu erkennen. Abb. S. 5-2 zeigt die Elliptizitätswerte aller Ereignisse und Stationen. Die Streuung der Werte ist

vergleichbar mit der von Boore und Toksöz ('69) für das LASA-Array (Montana, USA) erhaltenen, die von Sexton et al. ('77) auf die heterogene geologische Struktur innerhalb des Arrays zurückgeführt wird. Die Behauptung, daß es sich bei der Elliptizität von Rayleigh-Wellen um eine für den Beobachtungsort lokale Größe, unabhängig vom Ausbreitungsweg handelt, wird durch die Beobachtungen für das Gräfenberg-Array nicht untermauert. Hingegen kann die These, daß die Elliptizität wesentlich von sedimentären Deckschichten beeinflusst wird, insofern theoretisch bestätigt werden, als die Werte der partiellen Ableitungen der Elliptizität nach dem v_p/v_s -Verhältnis der Deckschichten (bei einem modifizierten Modell von "OCH") etwa eine Größenordnung größer sind, als die der Gruppengeschwindigkeit. Für eine weitergehende Klärung der Frage, in wie weit lokale Heterogenitäten Oberflächenwellen beeinflussen, müssten theoretische Seismogramme für echt dreidimensionale Modelle berechnet werden. Dabei dürfte aber die Rechenleistung der meisten derzeit zur Verfügung stehenden Computer überschritten werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit entstand ein Programmpaket zur digitalen Signalverarbeitung von Seismogrammen, dessen Benutzer-Schnittstelle so konzipiert wurde, daß sowohl hochgradig interaktives Vorgehen im Experimentier-Stadium, als auch ein vollständig automatischer Ablauf verschiedener Analyseschritte bis zum "Produktions-" Stadium möglich ist. Damit scheint die Hoffnung begründet, über ein hinreichend mächtiges Werkzeug für weitere Aktivitäten auf dem Gebiet seismischer Signalverarbeitung zu verfügen.





Beispiel für die gelungene nicht-
wissenschaftliche Interpretation
der Elliptizitäten des Baikalsees

Literaturverzeichnis

BSSA = Bull. Seism. Soc. Amer.

Alterman Z., Jarosch H., Pekeris C.L. : Oscillations of the Earth
Proc. Roy. Soc. (London) A 252 : 80-95 ('59)

Ben Menahem A., Harkrider D.G. : Radiation patterns of seismic
surface waves from buried dipolar point sources in a
flat stratified earth .
J. of Geoph. Res. 69 : 2605-2620 ('64)

Boore D.M., Toksöz M.N. : Rayleigh wave particle motion and
crustal structure . BSSA 59 : 331-346 ('69)

Canitez N. : Optimum filter for surface-wave group velocity
determination . BSSA 67 : 79-85 ('77)

Capon J. : High resolution frequency-wavenumber spectrum
analysis . Proc. IEEE 57 : 1408-1418 ('69)

Capon J. : Analysis of Rayleighwave multipath propagation at
LASA . BSSA 60 : 1701-1731 ('70)

Chen T.C., Alsop L.E. : Reflection and transmission of obliquely
incident Rayleigh waves at a vertical discontinuity
between two welded quarterspaces .
BSSA 69 : 1409-1423 ('79)

Crampin S. : Distinctive particle motion of surface waves as a
diagnostic of anisotropic layering .
Geophys. J.R. astr. Soc. 40 : 177-186 ('75)

Crampin S., King D.W. : Evidence for anisotropy in the upper
mantle beneath Eurasia from the polarisation of higher
mode seismic surface waves .
Geophys. J.R. astr. Soc. 49 : 59-85 ('77)

Crampin S., Kirkwood S.C. : Surface wave propagation in an
ocean basin with anisotropic upper mantle : observations
of polarization anomalies .
Geophys. J.R. astr. Soc. 64 : 487-497 ('81)

Drake L.A. : Love and Rayleigh waves in nonhorizontally layered
media . BSSA 62 : (1241-1258) ('72)

Drake L.A., Bolt B.A. : Love waves normally incident at a
continental boundary . BSSA 70 : 1103-1123 ('80)

Dziewonski A., Hales A.L. : Numerical analysis of dispersed
seismic waves.
in Methods in computational physics Vol 11, Academic
Press, London - NY, 39-85 ('72)

Faber S. : GRF-Array-Kalibrierung .
Vortragszusammenfassung der DGG 43 : C26 ('83)

- Gebrande H. : Elliptizität von Rayleigh-Wellen ,
Vortragsszusammenfassung der Arge - GRF ('82)
- Gregersen S., Alsop L.E. : Mode conversions of Love waves at a
continental margin . BSSA 66 : 1855-1872 ('76)
- Harges H.P., Seidl D. : Digital recording and analysis of
broad-band seismic data at the GRF-array .
J.Geophys. 44 : 511-523 ('76)
- Inston H.H., Marshall P.D., Blamey C. : Optimization of filter
bandwidth in spectral analysis of wavetrains .
Geophys. J.R. astr. Soc. 23 : 243-250 ('71)
- Kind R. : Extensions of the reflectivity method.
J.Geophys. 45 : 373-380 ('79)
- Lüders W. : Untersuchungen zum Polarisationsverhalten von Raum-
wellen - ein Beitrag zur Signalverarbeitung in der
Refraktionsseismik .
unveröffentl. Dipl.arbeit am Inst.f.A.u.A. Geophys. d.
LMU München
- Panza G.F., Schwab F.A., Knopoff L. : Multimode surface waves for
selected focal mechanisms I. Dip-slip sources on a vertical
fault plane . Geophys. J.R. astr. Soc. 34 : 265-278 ('73)
- Pekeris C.L. : Propagation of sound in the ocean .
Geol. Soc. Am., Memoir 27 : 1-117 ('48)
- Rademacher H., Odom R.I., Kind R. : The upper mantle structure
under SE Europe derived from GRF broadband records of
Greek earthquakes. J.Geophys. 52 : 7-13 ('83)
- Samson J.C. : Matrix and Stokes vektor representations of
detectors for polarized waveforms : theory with some
applications to teleseismic waves .
Geophys. J.R. astr. Soc. 51 : 583-603 ('77)
- Seidl D. : Spezielle Probleme der Ausbreitung seismischer
Oberflächenwellen mit Beobachtungsbeispielen aus Europa.
Dissertation, Univ. Karlsruhe, ('71)
- Seidl D., Müller S. : Seismische Oberflächenwellen .
J.Geophys. 42 : 283-328 ('77)
- Sexton, J.L., Rudman A.J., Mead J. : Ellipticity of Rayleigh waves
recorded in the midwest . BSSA 67 : 369-382 ('77)
- Wielandt E., Streckeisen G. : The leaf spring seismometer:
design and performance . BSSA 72 : 2349-2367 ('82)

Danksagung

Mein herzlicher Dank gilt

meinen verehrten Lehrern
Prof. Dr. G. Angenheister
Prof. Dr. H. Soffel

und
für ihr Interesse am Fortgang der Arbeit
und die hilfreiche Korrektur des Manuskripts,

Dr. H. Gebrande

für die Anregung und Betreuung der Arbeit,

Dr. D. Seidl

für sein ermunterndes Interesse und seine
Hilfsbereitschaft,

Dipl. Geoph. W. Brüstle

für die Berechnung synthetischer 3K-Seis-
mogramme,

Dr. R. Kind und

Dr. W. Hanka

für die freundliche Überlassung von Soft-
ware

und allen jenen, deren Interesse die notwendige Atmosphäre geschaffen hat,
die zum Gelingen wissenschaftlicher Arbeit unabdingbar ist.

Lebensdaten

Name	Wolfram Lüders	
Geburtstag	9.7. '55	
Geburtsort	Rosenheim	
Eltern	Wolfgang Lüders (Techniker), Rosemarie Lüders geb. Jenne (Lohnbuchhalterin)	
Schulen	'61-'65	Volksschule Großkarolinenfeld
	'65-'74	Finsterwalder-Gymnasium Rosenheim (math.-nat.wiss. Zweig)
Studium	10/'74-5/'80	Studium der Geophysik an der LMU München
	11/'76	Diplom- Vorprüfung
	5/'80	Diplom- Hauptprüfung, Nebenfach Nachrichten- Technik
	11/'80-10/'82	Aufbaustudium Informatik an der TUM
Arbeitsverhältnisse		
	7/'80-10/'80	wiss. Mitarbeiter am Inst.f.a. Geologie der LMU (Bildverarbeitung und Krater- statistik)
	7/'81-8/'82	wiss. Mitarbeiter am Inst.f. Geophysik der LMU im Schwerpunktprogramm "Digitale Signalverarbeitung" ; Beginn der Dissertationsarbeit
	10/'82-1/'83	wiss. Mitarbeiter am Inst.f. Optoelektronik der DFVLR, Wessling, (Bildverarbeitung)
	9/'83-12/'83	wiss. Mitarbeiter am Inst.f. Geophysik der LMU, (seismische Modellrechnung)

